

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інженерно-фізичний факультет**

**Кафедра фізики металів**

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

Івашенко Є.В.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**з напрямку підготовки 6.050403 «Інженерне матеріалознавство»**

**на тему: «Зміцнення поверхні сплаву АМг6 електроіскровим легуванням Си  
та ультразвуковою ударною обробкою»**

Виконав:

студент ІV курсу, групи ФІ-51-1

Малахов Дмитро Сергійович

Керівник:

професор КФМ, д.ф.-м.н., Волошко С.М.

Консультант з наукової частини:

Мордюк Б.М.

Консультант з питань нормоконтролю:

ас. Шаповалова Н.А.

Консультант з економічно-організаційної частини:

к.е.н., ст. викладач Нараєвський С.В.

Консультант з охорони праці:

д.т.н., професор Левченко О.Г.

Рецензент:

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 рік

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інженерно-фізичний факультет**  
**Кафедра фізики металів**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.050403 «Інженерне матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Іващенко Є.В.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

**Малахову Дмитру Сергійовичу**

1. Тема роботи «Зміцнення поверхні сплаву АМгб електроіскровим легуванням Си та ультразвуковою ударною обробкою», керівник роботи професор КФМ, д.ф-м.н., Волошко С.М., затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_
2. Термін подання студентом роботи \_\_\_\_\_
3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
4. Зміст роботи \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів роботи\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Експериментальна частина	старший науковий співробітник, д.ф-м.н., Мордюк Б.М.		
Економічно-організаційний	к.е.н., ст. викладач Нараєвський С.В		
Охорона праці	д.т.н., професор Левченко О.Г.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання		
2	Огляд літератури		
3	Освоєння методик дослідження		
4	Виконання експериментальних досліджень		
5	Отримання результатів, їх аналіз		
6	Оформлення дипломної роботи		
7	Попередній захист		
8	Захист на засіданні ЕК		

Студент

Малахов Д.С.

Керівник роботи

Волошко С.М.

---

\* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 76 с., 19 рис., 11 табл., 49 джерела.

### АМг6, ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ, МАСОПЕРЕНЕСЕННЯ, МІКРОТВЕРДІСТЬ, СТРУКТУРА, УЛЬТРАЗВУКОВА УДАРНА ОБРОБКА, ФАЗОВИЙ СКЛАД

Об'єкт дослідження – фізико-хімічні процеси, які відбуваються внаслідок електроіскрового легування міддю та ультразвукової ударної обробки поверхні алюмінієвого сплаву АМг6.

Мета роботи – синтез композиційних покриттів на поверхні сплаву АМг6 електроіскровим легуванням Cu з подальшою ультразвуковою ударною обробкою.

Методи дослідження – мікродюрOMETричний, рентгеноструктурний та мікрорентгеноспектральний аналіз, просвічувальна електронна мікроскопія, а також випробування на корозійну стійкість.

Практичне значення – одержані в роботі наукові результати представляють практичний інтерес для машинобудування та авіаційної галузі.

Результати досліджень – запропоновано ефективний спосіб зміцнення поверхневого шару алюмінієвого сплаву АМг6 за допомогою комбінованої обробки – ЕІЛ та УЗУО. Електроіскрове легування мідним електродом сприяє зміцненню поверхні за рахунок утворення в приповерхневому шарі товщиною до 25 мкм інтерметалідних фаз –  $Al_2Cu$  та  $Al_6Mg_4Cu$ . Ультразвукова ударна обробка обумовлює диспергування субзеренної/зеренної структури, підвищує твердість на 70-80% та сприяє інтенсифікації масопереносу легуючого елементу. Результатом комбінованої обробки є підвищення мікротвердості (в 3,5 рази) та корозійної стійкості поверхневих шарів сплаву АМг6 у порівнянні з вихідним станом.

## ABSTRACT

Diploma work: 76 pages, 19 tables, 11 figures, 49 references.

AMg6, ELECTRIC LEGISLATION, MASS-TRANSMISSION, MICRO-RESISTANCE, STRUCTURE, ULTRASONIC IMPACT TREATMENT, PHASE COMPOSITION

The object of research is the physical and chemical processes that take place near the electrosurgical doping of copper and ultrasonic shock treatment of the surface of aluminium alloy AMg6.

The purpose of the work is the synthesis of composite coatings on the surface of AMg alloy by the electrospray doping of Cu followed by ultrasonic shock treatment.

Methods of research - microdyrometric, X-ray and micro-ray diffraction analysis, transdermal electron microscopy, as well as corrosion resistance tests.

Practical significance - the scientific results obtained in the work are of practical interest to the mechanical engineering and aviation industry.

The results of the research - an effective way to strengthen the surface layer of aluminium alloy AMg6 with the help of combined processing - EIL and UIT. Electrospray doping with copper electrode helps to strengthen the surface due to the formation in the near-surface layer up to 25 microns of intermetallic phases -  $\text{Al}_2\text{Cu}$  and  $\text{Al}_6\text{Mg}_4\text{Cu}$ . Ultrasonic shock treatment causes the dispersion of the sub-grains / grain structure, increases the hardness by 70-80 % and promotes the intensification of the mass transfer of the alloying element. The result of the combined treatment is an increase in microhardness (3,5 times) and corrosion resistance of the surface layers of AMg6 alloy as compared to the initial state.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....	8
ВСТУП .....	9
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....	12
1.1 Алюміній та його сплави .....	12
1.2 Магналії .....	13
1.3 Сплав АМгб .....	17
1.4 Ультразвукова ударна обробка .....	18
1.5 Висновки до розділу 1 .....	21
2 МЕТОДИКА ТА МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	22
2.1 Використані матеріали .....	22
2.2 Електроіскрове легування .....	22
2.3 Режими УЗУО та обладнання .....	23
2.4 Методики дослідження .....	25
2.4.1 МікродюрOMETричний аналіз .....	25
2.4.2 Рентгенівські методи дослідження .....	26
2.4.3 Мікрорентгеноспектральний аналіз .....	28
2.5 Висновки до розділу 2 .....	30
3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ .....	31
3.1 Підвищення мікротвердості при комбінованій обробці .....	31
3.2 Механізм зміцнення поверхні .....	33
3.3 Масоперенос при електроіскровому легуванні .....	35
3.4 Фазовий склад поверхневих шарів алюмінієвого сплаву АМгб .....	37
3.5 Корозійні властивості сплаву АМгб після електроіскрового легування та ультразвукової ударної обробки .....	41
3.6 Висновки до розділу 3 .....	43
4 ОРГАНІЗАЦІЙНА- ЕКОНОМІЧНО ЧАСТИНА .....	44
4.1 Науково-технічна актуальність НДР .....	44
4.2 Мета і завдання науково-дослідницької роботи .....	45
4.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження .....	45
4.3.1 Зарплата виконавців по темі .....	46
4.3.2 Єдиний соціальний внесок .....	47

4.3.3 Витрати на матеріали, що використовуються в роботі .....	48
4.3.4 Витрати на спеціальне обладнання та прилади .....	48
4.3.5 Витрати на службові відрядження .....	48
4.3.6 Інші прямі невраховані витрати .....	49
4.3.7 Накладні витрати .....	49
4.3.8 Планова кошторисна вартість НДР .....	49
4.4 Економічна ефективність НДР .....	50
4.5 Висновки до розділу .....	54
5 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	55
5.1 Правові та організаційні основи охорони праці .....	55
5.2 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів .....	55
5.2.1 Мікроклімат .....	55
5.2.2 Освітленість .....	58
5.2.3 Шум .....	59
5.2.4 Вібрації .....	60
5.2.5 Електробезпека .....	60
5.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці .....	62
5.3.1 Організація робочого місця .....	62
5.3.2 Вентиляція .....	63
5.4 Розрахунок інженерного рішення .....	63
5.4.1 Розрахунок вентиляції .....	63
5.5 Пожежна безпека .....	64
5.6 Висновки до розділу 4 .....	66
ВИСНОВКИ .....	67
CONCLUSIONS .....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	69

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ТЕМ – трансмісійна електронна мікроскопія

УЗУО – ультразвукова ударна обробка

ОЦК – об’ємноцентрована кубічна ґратка

ГЦК – гранецентрована кубічна ґратка

РЕМ – растрова електронна мікроскопія

ППД – поверхнева пластична деформація

ЕІЛ – електроіскрове легування

$H_v$  – мікротвердість

$K_{hard}$  – ступінь зміцнення

$I_{hard}$  – інтенсивність зміцнення

$E_c$  – потенціал корозії

$I_c$  – щільність струму корозії

НВ – твердість за Брінеллем

$K$  – глибина проникнення рентгенівського випромінювання

$d$  – міжплощинна відстань

$\theta$  – кут дифракції

МКД – мікродеформація

ЕДАР – енергодисперсійний аналізатор

ОКР – область когерентного розсіювання

НДР – науково-дослідницька робота

ФЗП – фонд заробітної плати

$V_c$  – єдиний соціальний внесок

$C_M$  – витрати на матеріали

$C_{інш.}$  – інші прямі витрати

$H_B$  – накладні витрати

ОП – охорона праці



## ВСТУП

В даний час істотно зросло використання алюмінієвих сплавів в транспорті, в будівництві і в інших галузях промисловості. Широке поширення отримали деформівні алюмінієві сплави. Вони оптимально поєднують механічні характеристики з хорошою технологічністю при порівняно невисокій вартості. Ці сплави мають досить високу конструкційну міцність і підвищену пластичність, що дозволяє уникнути крихкого руйнування деталей і конструкцій, що з них виготовляються. У той же час дія циклічних і динамічних навантажень при експлуатації може призводити до деградації поверхневих шарів, що істотно знижує довговічність виробів за рахунок втоми і зносу [1, 2]. Тому актуальним напрямком поліпшення експлуатаційних властивостей є модифікація робочих поверхонь цих сплавів.

Найбільш поширеним методом зміцнення поверхневих шарів металів і сплавів є поверхнева пластична деформація (ППД) [3-5]. Поряд з традиційною дробеструменевою обробкою високу ефективність показує ультразвукова ударна обробка (УЗУО) [6-8]. Однак, в таких матеріалах, як сплав АМг6, який знайшов широке застосування в різних галузях промисловості завдяки пластичності і гарній зварюваності [9], можливості деформаційного зміцнення вельми обмежені.

Нещодавно, ультразвукова ударна обробка (УЗУО) була успішно застосована для отримання композиційних шарів в алюмінії [10-13] і сплаві АМг6 [14, 15]. УЗУО дозволяє досягти рівномірного розподілу дисперсних зміцнюючих часток і модифікувати структуру в поверхневому шарі товщиною до 50 мкм [10-15]. Однак, проблема недостатньо високої міцності міжфазних границь поки ще не знайшла свого рішення. Застосування ЕІЛ для попереднього легування поверхні, а також її подальше деформування за допомогою УЗУО дає можливість отримувати модифіковані шари з покращеними властивостями за рахунок формування дисперсних зміцнюючих фаз, міцно пов'язаних з матрицею.

Електроіскровою обробкою, при якій відбувається легування поверхні металу виробом (катода) матеріалом електрода (анода) при іскровому розряді [16, 17], може бути здійснено поверхнєве зміцнення за рахунок зміни вихідних фізичних і хімічних властивостей поверхневого шару. Електроіскрова обробка веде до утворення на поверхні деталі шару, якому притаманні відмінні від вихідного стану структура і властивості, що залежать від параметрів іскрового розряду, складу електродного матеріалу, властивостей матеріалу оброблюваної деталі та інших чинників. Ефективність такого методу для підвищення мікротвердості, зносостійкості, жаростійкості та інших властивостей показана в цілому ряді робіт [16-18]. Експериментальними дослідженнями встановлено, що збільшення потужності режимів легування (струму  $i$  / або напруги електричних імпульсів) призводить до суттєвого підвищення продуктивності процесу ЕІЛ. Однак шорсткість і залишкова пористість поверхневих шарів при цьому істотно зростають [18]. Труднощі в отриманні рівномірно зміцнених шарів необхідної шорсткості і щільності пов'язані також з тим, що застосовуються установки для ЕІЛ, які як правило, забезпечені ручним вібратором. Нерівномірна обробка знижує надійність і довговічність експлуатації зміцнених виробів.

З іншого боку, перспективним шляхом створення покриттів і модифікованих шарів з заданими властивостями може бути використання комбінованих впливів, наприклад, поєднання електроіскрової (ЕІЛ) та ультразвукової ударної обробки (УЗУО) [19, 20]. За допомогою ультразвукової ударної обробки вдається отримувати зміцнені поверхневі шари з низькою шорсткістю поверхні, що дозволяє зменшити ймовірність виникнення поверхневих тріщин при циклічному навантаженні [21, 22]. В процесі УЗУО формуються стискаючі напруження, які також повинні позитивно позначатися на втомних властивостях поверхневого шару. Тому, проведення досліджень спільного впливу ЕІЛ і УЗУО на структурно-фазові особливості сформованих модифікованих шарів та визначення оптимальних режимів обробки може бути основою створення нових комбінованих технологій зміцнення виробів.

Метою цієї роботи є синтез композиційних покриттів на поверхні сплаву АМг6 електроіскровим легуванням Си з подальшою ультразвуковою ударною обробкою.

Відповідно до мети роботи було поставлено наступні задачі дослідження:

- 1) розробка комбінованого способу зміцнення поверхневих шарів сплаву АМг6 електроіскровим легуванням атомами міді з наступною ультразвуковою ударною обробкою на повітрі;
- 2) Встановлення впливу режимів запропонованої комбінованої обробки на структуру та фазовий склад, а також мікротвердість поверхневих шарів сплаву АМг6;
- 3) Дослідження корозійних властивостей синтезованих покриттів.

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

### 1.1 Алюміній та його сплави

Алюміній – хімічно активний елемент, однак він легко покривається оксидною плівкою  $Al_2O_3$ , що захищає його поверхню від подальшої взаємодії із середовищем. Питомий об'єм алюмінію та його оксиду близькі, тому плівка щільна. Вона має гарне зчеплення з металом та мало проникна для усіх газів. Алюміній стійкий у багатьох органічних кислотах, але швидко розчиняється у розчинах їдких лугів. При звичайних температурах алюміній не взаємодіє із водою, парами вологи,  $CO$ ,  $CO_2$ , але з підвищенням температури реакція відбувається. Активно взаємодіє з парами вологи при температурі більше  $500\text{ }^{\circ}C$ .

Алюміній має високу корозійну стійкість у морській воді. Він стійкий у тих середовищах, що не руйнують захисну оксидну плівку. Специфічна властивість алюмінію – здатність поглинати нейтрони, дозволяє застосовувати його в атомних реакторах. Механічні властивості відпаленого алюмінію високої чистоти наведені в табл. 1.1 [23].

Таблиця 1.1 – Механічні властивості алюмінію різної чистоти у відпаленому стані [23]

Чистота, %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	НВ, МПа	$\delta$ %
99,99	22	49	84 – 112	45,5
99,8	25	61	133	38,5
99,5	28	70	126 – 175	31,5

Холодна пластична деформація підвищує границю міцності  $\sigma_b$  до 150 МПа, але знижує видовження  $\delta$  до 6 %. Для алюмінію чистотою 99,25 % при кімнатній температурі модуль Юнга дорівнює  $710\text{ МН/м}^2$ , а для алюмінію чистотою 99,98 % – тільки  $670\text{ МН/м}^2$ . При охолодженні нижче 120 К міцнісні

властивості алюмінію, на відміну від більшості металів, зростають, а пластичні не змінюються. Алюміній легко обробляється тиском, зварюється усіма видами зварювання, але його обробка різанням ускладнена [23].

## 1.2 Магналії

Магналії – алюмінієві сплави з магнієм. У залежності від марки, містять від 0,4 % до 6,3 % магнію, а також кремній, залізо, мідь. Маркування магналіїв включає літери А – алюміній та Мг – магній. Цифра позначає середній вміст магнію. Хімічний склад основних магналіїв наведений в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад та механічні властивості сплавів системи Al- Mg [23]

Марка сплаву	Хімічний склад, %				Механічні властивості		
	Al	Mg	Mn	Ti	σ <sub>B</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ, %
АМг	Основа	-	1,3	-	130	50	23
АМг1	Основа	0,5	-	-	150	70	32
АМг2	Основа	1,8	0,2	-	200	100	23
АМг5	Основа	5,0	0,6	0,6	320	150	20
АМг6	Основа	6,0	0,8	0,1	340	170	20

Додаткове введення 0,2 % - 0,8 % марганцю підвищує міцнісні характеристики магналій, титан використовується в якості модифікатора зеренної структури в злитках безперервного лиття, в зварних швах, зменшуючи тим самим схильність сплавів до кристалізаційного розтріскування при литті та аргонодуговому зварюванні. При вмісті в сплаві більше 5 % магнію до складу сплавів вводять добавку берилію, призначення якого – оберігати алюмінієвий розплав від інтенсивного окислення під час плавки і лиття, в процесі зварювання напівфабрикатів, при гарячій обробці тиском.

Залежно від вмісту магнію, магналії ділять на деформівні (до 7 % Mg) і ливарні (5 % - 10 % Mg).

Магній підвищує міцність алюмінію. При кімнатній температурі в алюмінії розчиняється близько 1,4 % Mg (рис. 1.1). Кожен відсоток магнію підвищує міцність алюмінію приблизно на 30 МПа, але при вмісті магнію вище 6 % різко знижується корозійна стійкість, з'являється схильність до корозії під напруженням, знижується тріщиностійкість. Тому сплави з вмістом більше 6 % магнію не випускають [23].

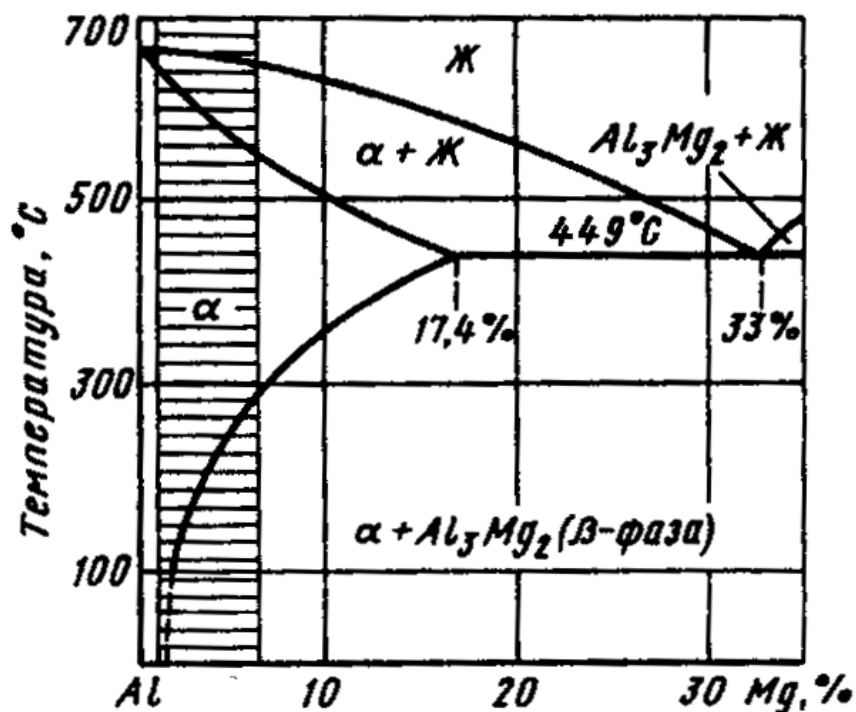
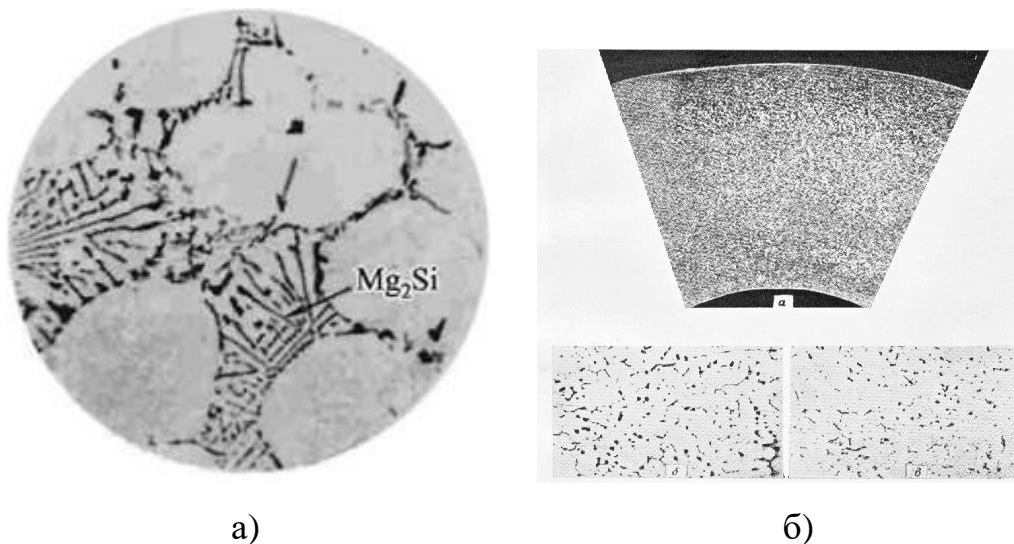


Рисунок 1.1 – Діаграма стану системи Al-Mg. Штрихами позначено зону промислових магналій [23]

Магналії практично не зміцнюється при термічній обробці, зміцнення настає тільки при  $Mg > 8\%$ . Сплав АМц піддається рекристалізаційному відпалу і зміцнюється холодною пластичною деформацією. Оскільки марганець підвищує температуру рекристалізації алюмінію, то температура відпалу сплаву АМц становить 450 °С - 470 °С. Структура сплаву АМц складається з твердого розчину на основі алюмінію і частинок фази  $MnAl_6$ .

Напівфабрикати зі сплавів Al-Mg піддаються тільки відпалу для зняття нагартування і переведення їх у м'який відпалений стан. Крім того, відпал як холоднодеформованих, так і гарячедеформованих напівфабрикатів з вмістом магнію більше 5 % підвищує їх опір хімічній корозії і корозії під напруженням. Сплави з більш низьким вмістом магнію мають високу стійкість проти будь-яких видів корозії як у відпаленому, так і в нагартваному стані. Відпал напівфабрикатів і виробів з магналіїв необхідно проводити при температурах 310 °С - 335 °С протягом 2 годин з наступним охолодженням на повітрі. Для сплавів АМг5, АМг6, АМг61, 01570 при охолодженні після відпалу необхідно робити витримку при 250 °С - 260 °С протягом 1 години, потім охолоджувати з нерегламентованою швидкістю.

Магналії типу АМг являють собою альфа-твердий розчин з включенням частинок другої фази. Марганець в сплавах АМг присутній в фазі  $MnAl_6$ , титан і цирконій перебувають в фазах  $ZrAl_3$  і  $TiAl_3$ . Вони сприяють отриманню більш дрібнозернистої структури, зміцнюють сплави. Сплави АМг піддаються відпалу при температурі 350 °С - 400 °С. Структура сплавів наведена на рис. 1.2.



а) сплав АМг5К, б) сплав АМг2

Рисунок 1.2 – Мікроструктури магналій [23]

Переваги магнелій полягають в поєднанні високої пластичності, корозійної стійкості з хорошою зварюваністю при задовільній міцності. Сплави АМг відрізняються високою вібраційної стійкістю, але мають низьку межу плинності. Для її підвищення сплави АМг5 і особливо АМг6 часто піддають холодній пластичній деформації до 20 % - 30 %, поки зберігається досить висока пластичність і корозійна стійкість. Деякі механічні властивості магнелій наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Механічні характеристики магнеліїв [23]

Сплав	Обробка	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	$\sigma_{-1}$ , МПа
АМг2М	Відпал	200	100	23	45	110
АМг2Н2	Неповний відпал	250	200	10	60	135
АМг3М	Відпал	220	110	20	50	-
АМг5М	Відпал	300	150	20	65	-
АМг6М	Відпал	350	170	20	70	130
АМг6Н	Нагартування на 20%	390	300	10	-	-
АМг6НПП	Нагартування на 30%	430	350	8	-	-

Сплави з низьким вмістом магнію (АМг1, АМг0,5) використовуються для виготовлення виробів підвищеної декоративності із високою відбивною здатністю. Сплави з 2 % - 4 % вмісту магнію (АМг2, АМг3) застосовуються в слабо навантажених зварних конструкціях, здатних працювати тривалий час в агресивному корозійному середовищі. Сплави з більш високим вмістом магнію (АМг5, АМг6) застосовуються в зварних конструкціях для виготовлення ємностей, що використовуються в тому числі і при криогенних температурах. Сплав 01570 є порівняно новим, і напівфабрикати з цього сплаву (поряд із сплавами АМг5, АМг6) застосовуються в ракетно- космічній техніці, суднобудуванні, а також для інших цілей [23].



### 1.3 Сплав АМг6

Дана марка алюмінієвого сплаву належить до групи Al-Mg-Mn – деформівних і досить пластичних сплавів. Подібні властивості проявляються вже при кімнатній температурі, в той час, як при підвищених сплав АМг6 демонструє відмінну зварюваність і середні характеристики. Будучи термічно незміцненим, найбільшого поширення він отримав у виробництві біметалевих листів.

При тому, що щільність сплаву АМг6 (питома вага) становить  $2640 \text{ кг/м}^3$ , він наділений не надто великою твердістю:  $\text{HB } 10^{-1} = 65 \text{ МПа}$ . Межа плинності АМг6 в залежності від температури і виду прокату може варіюватися в межах  $130 \text{ МПа} - 385 \text{ МПа}$ .

Завдяки вмісту в сплаві марганцю матеріал набуває підвищених механічних властивостей. При цьому після холодної деформації заготовки деталей зміцнюється ще більше. З використанням зварювання сплав АМг6 кілька втрачає свої властивості міцності, тому для скріплення нагартованих деталей застосовують заклепки або інші елементи кріплення.

АМг6 – сплав куди більш міцний, ніж АМг2 або АМг3, тому цілком підходить для штампування деталей, що зазнають статичних навантажень. Відносно невеликі напруження не приводять до розтріскування матеріалу, тому алюміній марки АМг6 часто стає кращим варіантом для створення середньонавантажених зварних і клепаних конструкцій, крім іншого, потребують високої корозійної стійкості.

Широко використовується сплав АМг6 в аерокосмічній галузі: такий алюміній йде на виробництво величезних паливних баків. Не обходяться без алюмінію цієї марки автомобільна промисловість, хімічна, і в цілому машинобудування. АМг6 – це кузова залізничних вагонів, підвісні стелі і ємності для різних рідин.

Поставки алюмінію на підприємства виробляються в різному вигляді: труби, профілі, листи, штампування необхідних розмірів і форм. Зазвичай такі напівфабрикати знаходяться вже в відпаленого стані.

#### **1.4 Ультразвукова ударна обробка**

Методи ультразвукової ударної обробки (УЗУО) належать до методів інтенсивної пластичної деформації під дією механічних контактних впливів проміжними ударними елементами із високою частотою  $\sim (1 - 2)$  кГц, джерелом яких є ультразвукові коливання частотою близько 20 кГц [25, 26].

Зазвичай методи УЗУО застосовуються для покращення комплексу властивостей зварних з'єднань та зміцнення частин конструкцій, що відіграють роль концентраторів напружень. Загалом дослідження впливу ультразвуку великої інтенсивності розпочалося ще в 70-х роках минулого століття [25]. З кожним роком ультразвукова обробка відкривала ряд перспектив у застосуванні. Така популярність даної обробки пояснюється багатократним ударним навантаженням поверхні оброблюваної деталі, внаслідок якого відбуваються процеси інтенсивного деформування та наклепу, що викликають суттєве зміцнення матеріалу та перебіг на його поверхні різноманітних фізичних явищ, наприклад, істотного підвищення рухливості атомів, тобто процесів аномального масопереносу [25, 26].

Внаслідок великої кількості експериментів та досліджень УЗУО було виявлено ряд переваг для зміцнення конструкцій та агрегатів [25]: 1) висока швидкість та легкість застосування; 2) можливість обробки конструкцій у важкодоступних місцях та деталей складної форми; 3) можливість значного подрібнення зерен, що можна використати при створенні деталей із високим рівнем поверхневого або об'ємного наклепу. При всіх перевагах УЗУО дозволяє отримати вироби із підвищеним запасом міцності до декількох разів, внаслідок оптимального розподілу внутрішніх напружень по ньому. Дане явище використовується для збільшення ресурсу деталей (до 10 разів) високої

відповідальності, котрі працюють в умовах високих та знакозмінних навантажень [25, 26]. Це підтверджено в роботі [25], в якій встановлено, що УЗУО приводить до інтенсивної деформації поверхневого шару, значного подрібнення зеренної структури та перерозподілу внутрішніх напружень матеріалу. В роботі [27] досліджено вплив ультразвукової обробки на структурно фазові перетворення, які протікають при синтезі газотермічних покриттів системи NiCr-B-C-Si, а саме вивчення ультразвукового впливу у процесі оплавлення покриттів та дослідження впливу ультразвукової ударної обробки на структуру і властивості зварних з'єднань сталей. Основні результати досліджень [27, 28]: 1) суттєве підвищення мікротвердості завдяки ультразвуковому впливу при оплавленні покриттів з Ni-Cr-B-Si-C; 2) інтенсифікація процесів масоперенесення елементів покриття до матриці, особливо вуглецю та бору; 3) попереднє ультразвукове ударне обробляння матриці призводить до значного підвищення міцності та зносостійких властивостей утворених композиційних покриттів; 4) УЗУО зварних з'єднань сталей супроводжується значним подрібненням зерен у поверхневих шарах матеріалу до 6 разів та підвищенням механічних властивостей; 5) також процес УЗУО характеризується перерозподілом розтягуючих напружень величиною 150 МПа на стискаючі – 50 МПа.

Як було вказано раніше метод ультразвукової ударної обробки характеризується безпосередньою взаємодією поверхні виробу із контактною частиною приладу. При цьому відбувається інтенсивний наклеп і деформація поверхні оброблюваного матеріалу та її розігрів (залежить від часу обробки) [28]. При цьому спостерігаються процеси подрібнення зерен та інтенсивного окисування у випадку Cu. Основні результати досліджень [27, 28] засвідчили, що УЗУО в інертних середовищах аргону чи гелію приводить до модифікації дислокаційної структури та значного подрібнення зерен у поверхневих шарах, навіть наноструктуризації, та інтенсифікації дифузійних процесів у металеву матрицю, що в свою чергу, підвищує значення величини мікротвердості до 2,5 разів та покращення зносостійкості. Аналогічні результати отримані при

обробці у середовищі рідкого азоту (відбувається підвищення мікротвердості до 5 разів порівняно із вихідним станом сплаву Д16). Вцілому доведено можливість синтезу композитних покриттів із підвищеним ресурсом роботи в умовах тертя та покращеними механічними властивостями [25]. Робота [29] присвячена дослідженню впливу УЗУО на корозійну стійкість та опір до пластичного деформування цирконієвих біосумісних стопів. Основні результати дослідження: 1) УЗУО призводить до значного подрібнення зерен, тобто утворення нанорозмірної структури; 2) спостерігається зростання опору до пластичних деформацій (внаслідок наклепу) та підвищення корозійної стійкості.

Ультразвукова ударна обробка також використовується в поєднанні з іншими методами покращення властивостей матеріалу, до прикладу, робота [30] присвячена дослідженню впливу лазерної термообробки в поєднанні із УЗУО на міцнісні характеристики інструментальної сталі AISI D2. Встановлено, що комбінована обробка приводить до формування ультрадисперсної структури розміром  $\sim 80$  нм – 250 нм з границями зерен зафіксованими дрібними вторинними карбідами розміром близько 20 нм. Така структура модифікованих шарів дозволяє підвищити значення мікротвердості та зносостійкості до 2 - 4 разів, а отже збільшити ресурс роботи агрегату. Варто додати, що лише комбінація лазерної термообробки та УЗУО приводить до суттєвого покращення механічних властивостей.

В роботі [31] проведено дослідження можливості армування сплаву Al6Mg частинками квазікристалічного сплаву  $\text{Al}_{63}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{12}$  за допомогою процесу ультразвукової ударної обробки. Показано, що на глибині до 40 мкм спостерігаються однорідно розподілені армуючі частинки. Зроблено висновок про підвищення міцнісних характеристик сплаву Al-6Mg, а саме зносостійкості приповерхневих шарів внаслідок армування за допомогою УЗУО.

Запропоновано гіпотезу, що ультразвукова ударна обробка із застосуванням порошків оксидів та нітридів ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) приводить до

синтезу відповідних захисних покриттів, що підвищують жаростійкі, корозійні та зносостійкі властивості матеріалу за певних робочих умов.

### **1.5 Висновки до розділу 1**

В результаті опрацювання літературних джерел, в яких розглянуто наслідки впливу інтенсивної пластичної деформації на механічні характеристики і структуру алюмінію та його сплавів у різних середовищах можна зробити наступні висновки:

1. метод УЗУО дозволяє впливати на структуру, підвищення ресурсу, механічні, фізико-хімічні та інші властивості легких конструкційних сплавів;

2. великий інтерес становить дослідження можливостей застосування різних режимів УЗУО для досягнення високоміцних станів поверхневих шарів сплаву АМг6;

3. після УЗУО спостерігається локальна неоднорідність не тільки структури, але й фазового складу сформованого покриття, тому доцільним є застосування комбінованих методів обробки.

## 2 МЕТОДИКА ТА МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Використані матеріали

В даній роботі досліджувався алюмінієвий сплав промислового виробництва – АМг6, склад якого наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад і механічні властивості сплаву АМг6 [23]

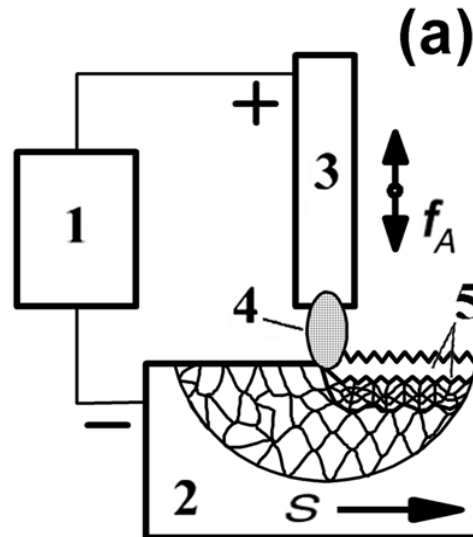
Хімічний склад (вага %)								Механічні властивості					
Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Al	E	$\nu$	$\sigma_Y$	$\sigma_{YH}$	$\sigma_B$	H $\mu$
5.8-6.3	0.6	0.4	0.4	0.1	0.2	0.02-0.1	bal.	70	0.3	170	280	320	840

Зразки мали циліндричну форму: висота 10 мм і діаметр 18 мм. Одержували шляхом різання з прутків перпендикулярно напрямку прокатки. Після відпалу при 320 °С зразки охолоджувалися з піччю, витримувалися при 250 °С протягом 1 години, а потім охолоджувалися до кімнатної температури.

### 2.2 Електроіскрове легування

ЕІЛ проводили із застосуванням стандартного промислового обладнання «Элитрон 22А» (рис. 2.1) [24] на повітрі за питомої тривалості обробки поверхні зразка – 1 хв/см<sup>2</sup>. Тривалість, енергія і частота проходження електричних імпульсів становили 200 мкс, 1,0 Дж і (50 ± 3) Гц, відповідно.

При періодичному вивільненні електричної енергії, накопиченої конденсатором 1, генеруються електроіскрові розряди 4 між двома електродами (катодом 2 – оброблюваним зразком і анодом 3 – матеріалом, призначеним для легування поверхні катода).



1 – генератор імпульсів, 2 – анод, 3 – зразок (катод), 4 – іскровий розряд, 5 – модифікований поверхневий шар,  $S$  – напрямок зміщення зразка,  $f_A$  – частота коливань аноду

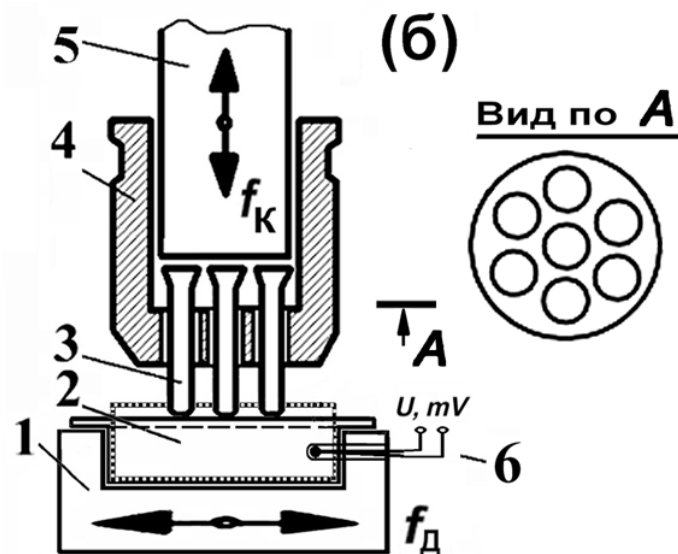
Рисунок 2.1 – Схема процесу електроіскрового легування [31]

Використовували мідний анод у вигляді дроту діаметром 0,5 мм – 1 мм. Обраний режим обробки забезпечував товщину легованого шару в межах 25 мкм – 50 мкм. Шорсткість поверхні вимірювали на профілографі П-210. Після ЕІЛ вона склала  $R_z \sim (5 - 10)$  мкм.

### 2.3 Режими УЗУО та обладнання

Ультразвукову обробку проводили на установці (рис. 2.2), що детально описана в [8, 10, 21, 22], з використанням генератора потужністю 0,3 кВт і інструменту, зібраного на п'єзокерамічному перетворювачі, з семи-бойковою ударною голівкою 4, розміщеною на кінці ступеневого концентратора. При частоті коливань торця ультразвукового концентратора  $\sim 21,6$  кГц бойки 3, поміщені між торцем концентратора 5 і зразком 2, здійснюють багаторазову ударну дію на поверхню зразка з більш низькою частотою від 1 кГц до 3 кГц [21-24]. Циліндричні зразки розташовані в тримачі, пов'язаному з низькочастотним вібратором. Тримач в процесі УЗУО здійснює зворотно-

поступальний рух в горизонтальній площині – в напрямку перпендикулярному напрямку ударних імпульсів. Така схема забезпечує наявність суттєвої зсувної складової ударного імпульсу, що сприяє зниженню шорсткості обробленої поверхні [14, 15, 21, 22]. Крім того, саме ударний характер і різнонаправленість багатократного впливу сприяють інтенсивній пластичній деформації поверхневих шарів і виникненню великої кількості дефектів в них.



1 – тримач зразка, 2 – зразок, 3 – бойки, 4 – корпус ударной головки, 5 – ультразвуковий концентратор, 6 – термопара,  $f_K$  та  $f_D$  – частоти концентратора і тримача зразка

Рисунок 2.2 – Схема вузлів навантаження при УЗУО [31]

УЗУО проводили протягом різного часу. Товщина модифікованих шарів в алюмінії [10-13] і сплаві АМг6 [14, 15] становить  $\sim 50$  мкм. Оптимальним вважався режим УЗУО (амплітуда  $A = 15$  мкм, час  $\tau = 30$  с - 60 с), при якому досягалася мінімальна шорсткість і максимальна мікротвердість поверхні зразків.



## 2.4 Методики дослідження

Розв'язання поставлених в роботі задач вимагало використання комплексу сучасних фізичних методів дослідження матеріалів.

### 2.4.1 МікродюрOMETричний аналіз

Вимірювання мікротвердості проводили за допомогою приладу ПМТ-3 за методом Віккерса. Метод ґрунтується на визначенні за допомогою мікроскопу лінійної величини діагоналі відбитку, який отримано в результаті втискання алмазної пірамідки, з кутом при вершині  $136^\circ$ , в досліджуваний матеріал під певним навантаженням.

Вимірювання проводилось після УЗУО та після ЕІЛ + УЗУО за різного часу обробки. Кількість вимірювань для кожного зразка – 10; потім вираховувалось середнє значення мікротвердості. Побудовано криву навантаження та визначено оптимальну величину навантаження для зразків сплаву АМгб. Навантаження на індентор дорівнювало 100 г, час витримки навантаження 10 с.

Ціна поділки барабана гвинтового окуляр-мікрометра  $E$  визначається за наступною формулою:

$$E = \frac{T \cdot Z}{A}, \quad (2.1)$$

де  $T$  – число поділок об'єкт-мікрометра,

$Z$  – ціна поділки об'єкт-мікрометра,

$A$  – різниця відліку окулярного мікрометра.

Значення мікротвердості  $Hv$  розраховувалось за формулою:

$$Hv = \frac{1,854P}{c^2}, \text{ ГПа}, \quad (2.2)$$

де  $P$  – навантаження в грамах,

C – діагональ відбитку.

#### 2.4.2 Рентгенівські методи дослідження

Застосовувався дифрактометр Ultima IV Rigaku. Зйомка проводилась в  $\text{CuK}\alpha$  з різним часом експозиції та кроком вимірювання.

В дифрактометрі Ultima IV Rigaku застосовується схема фокусування дифракційних максимумів за Брегом – Брентано, а також застосовується геометрія зйомки з паралельним пучком. Зразок розміщується в горизонтальній площині, діапазон кутів сканування  $2\theta$  від  $3^\circ$  до  $162^\circ$ .

Розрахунок глибини проникнення рентгенівського  $\text{CuK}\alpha$  випромінювання для досліджуваного матеріалу дав значення: 290 мкм для кратності поглинання  $\kappa = 50$ ; 220 мкм для  $\kappa = 20$ ; 170 мкм для  $\kappa = 10$ .

##### 2.4.2.1 Якісний фазовий аналіз, ідентифікація та визначення відносної кількості вторинних фаз

Якісний фазовий аналіз призначений для встановлення фаз, які присутні в зразку, а кількісний – визначення їх відсоткового вмісту. Умовою дифракції рентгенівських променів на кристалічній ґратці є умова Вульфа – Бреґга:

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (2.3)$$

де  $d$  – міжплощинна відстань, властива даній фазі, Å;

$\theta$  – кут дифракції рентгенівського променя даною системою атомних площин;

$\lambda$  – довжина хвилі випромінювання монохроматичних рентгенівських променів, падаючих на кристал, Å ( $\lambda_{\text{Cu}} = 1,5408$  Å);

$n$  – порядок дифракційного максимуму (будь-яке ціле число) [35].

Інтегральна інтенсивність рефлексу  $I_{hkl}$ , отриманого від площини з індексами  $(hkl)$  в  $n$ -му порядку «відбиття», причому  $H = nh$ ,  $K = nk$ ,  $L = nl$ , визначається наступним чином:

$$I_{hkl} = C \cdot L(\theta) \cdot |F_{hkl}|^2 \cdot P_{hkl} \cdot e^{-2M} \cdot A(\theta), \quad (2.4)$$

де  $C$  – спільний для всіх ліній дифрактограми множник, залежний від довжини хвилі випромінювання;

$|F_{hkl}|^2$  – структурний фактор.

$$F_{HKL} = \sum_{j=1}^N f_j \cdot e^{2\pi i(Hx_j + Ky_j + Lz_j)}, \quad (2.5)$$

де  $f_j$  – атомна амплітуда розсіяння, залежить від порядкового номера елементу;

$x_j, y_j, z_j$  – координати базисних атомів;

$F_{HKL}$  – чинник повторюваності, що враховує число еквівалентних площин, що дає одну і ту ж дифракційну лінію. Він залежить від типу кристалічної ґратки і сорту площини;

$e^{-2M}$  – температурний чинник;

$A(\theta)$  – чинник поглинання (залежить від досліджуваної речовини, довжини хвилі випромінювання і методу зйомки).

Інтенсивність рефлексу залежить, крім вказаних вище чинників, від режиму роботи рентгенівського апарату: струму через трубку; напруги на трубці; розміру щілин, режиму роботи лічильника квантів рентгенівського випромінювання, швидкості обертання зразка і лічильника. Інтенсивність рефлексу визначається кількістю даної фази. Якщо досліджуваний об'єкт складається з декількох фаз, то кожній фазі відповідатиме своя власна дифракційна картина [36].

### 2.4.3 Мікрорентгеноспектральний аналіз

Растрова електронна мікроскопія (РЕМ) – метод дослідження мікроструктури та складу поверхні твердого тіла. Цей метод ґрунтується на взаємодії сфокусованого електронного променя зі зразком, що досліджується, і дозволяє суттєво збільшити роздільну здатність зображення поверхні твердого тіла порівняно зі світловою мікроскопією. Для отримання зображення топографії поверхні об'єктів застосовуються вторинні або відбиті електрони.

В даній роботі для дослідження мікроструктури та хімічного складу поверхні зразків використовувався растровий електронний мікроскоп TESCAN Mira 3 LMU з енергодисперсійним аналізатором (ЕДАР) OXFORD X-MAX 80 mm<sup>2</sup>. В режимі зйомки поверхні зразків прискорююча напруга становила 30 кеВ, збільшення складало від 500 до 3000 разів.

Основними перевагами РЕМ є можливість спостерігати мікроструктуру поверхні як масивних зразків, так і тонких плівок без попередньої підготовки, висока інформативність, яка обумовлена можливістю отримання зображення, при використанні методів реєстрації. За допомогою РЕМ можна спостерігати поверхню зразка з роздільною здатністю до 3,0 нм та отримувати зображення у вторинних електронах з корисним збільшенням до 250000; вивчати структуру та топографію поверхні при пошаровому травленні [37].

Система енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізу призначена для експрес-аналізу хімічного складу поверхні твердого тіла в мікрооб'ємах, з мікронним розділенням, методом реєстрації енергії та інтенсивності характеристичного випромінювання, що генерується під час бомбардування зразка сфокусованим електронним променем. Ця система являє собою спектрометр енергій рентгенівського випромінювання в діапазоні від 1 кеВ - 40 кеВ. За допомогою спектрометра здійснювався кількісний елементний аналіз як на поверхні зразків після УЗУО, так і по товщині модифікованого

шару; будувалися графіки розподілу концентрацій елементів уздовж обраної лінії в напрямку від поверхні в об'єм сплаву АМг6.

#### 2.4.4 Корозійні дослідження

Для встановлення рівня корозійних властивостей алюмінієвого сплаву АМг6 та їх зміни внаслідок проведення електроіскрового легування міддю, а також ультразвукової ударної обробки було проведено додаткові корозійні дослідження за трьохелектродною схемою (рис. 2.3).

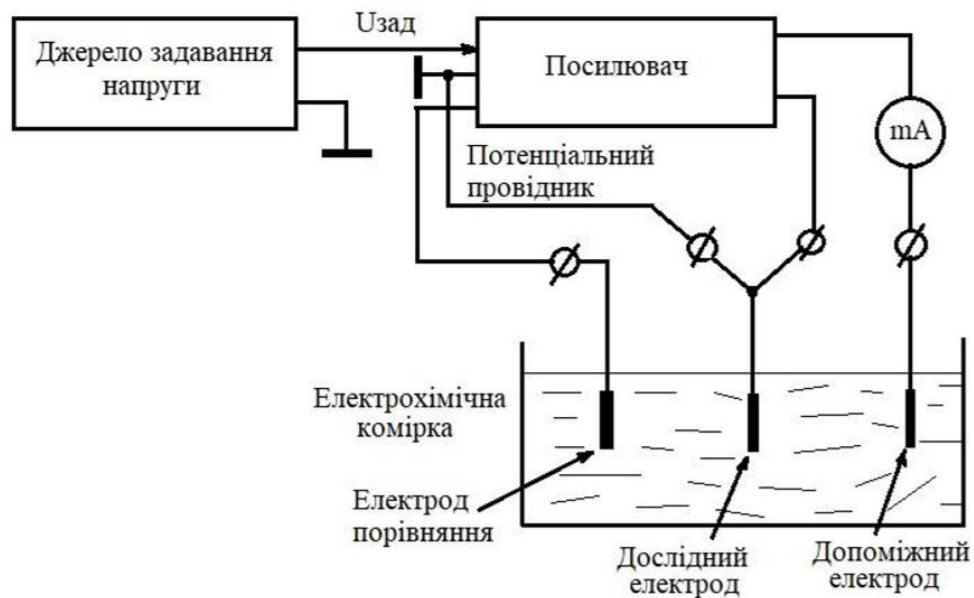


Рисунок 2.3 – Схема установки для корозійних досліджень [30]

Принцип роботи даної установки полягає в тому, що потенціостат підтримує потенціал (поляризуючий струм) електрода, що досліджується на заданому рівні, незалежно від змін, що протікають в електрохімічній комірці. Підтримка потенціалу здійснюється за рахунок зміни величини струму поляризації [34]. Разом із потенціостатом використовуються електрохімічні комірки, які в свою чергу складаються із електродів робочого порівняння (по відношенню до них вимірюють потенціал робочого електрода), а також із

допоміжного електрода для утворення робочого ланцюга через який відбувається проходження струму поляризації [34]. Із аналізу робочої схеми витікає, що на один із входів посилювача подають напруження задавання, а на інший різницю потенціалів між електродами порівняння та дослідження. Вхідні напруження, що надходять в посилювач порівнюють, отримана різниця потенціалів використовується для керування вихідним струмом, за рахунок якого відбувається поляризація електрода, що досліджується до рівня встановленого на джерелі напруги задавання [34].

## **2.5 Висновки до розділу 2**

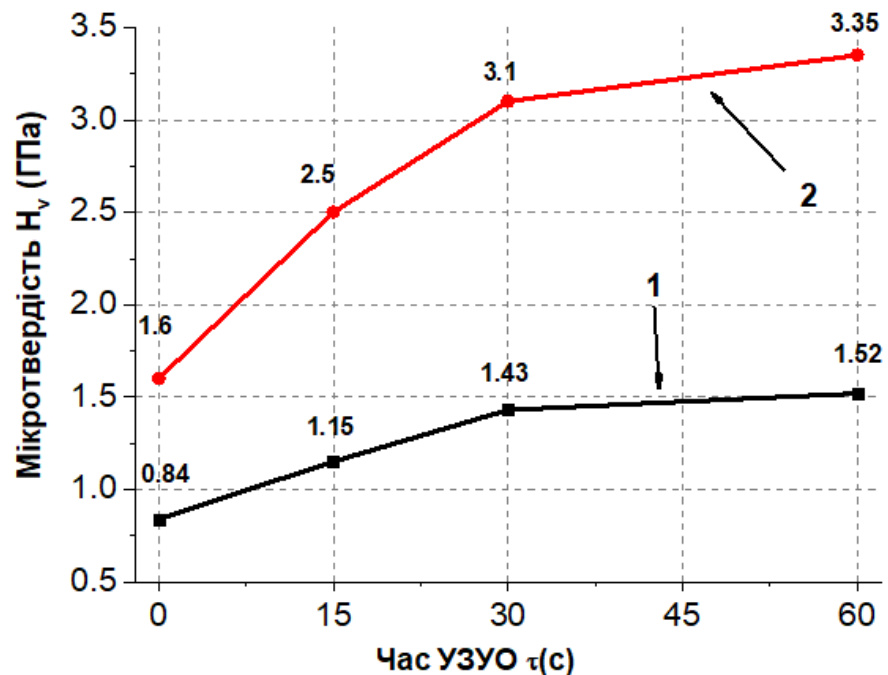
1. Як об'єкт дослідження використано алюмінієвий сплав АМг6 та синтезовано на його поверхні покриття на основі міді з подальшою ультразвуковою ударною обробкою.

2. Обрано комплекс сучасних експериментальних методів фізичного матеріалознавства – мікродюрOMETричний, рентгеноструктурний та мікрорентгеноспектральний аналіз, просвічувальна електронна мікроскопія, а також випробування на корозійну стійкість, що має забезпечити отримання достовірної інформації про закономірності синтезу захисних покриттів та їх властивостей.

## 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

### 3.1 Підвищення мікротвердості при комбінованій обробці

Застосування комбінованої обробки ЕІЛ + УЗУО призводить до утворення поверхневих шарів з підвищеною мікротвердістю (рис. 3.1). Легування міддю веде до значного зростання мікротвердості – більш ніж в 3,5 рази в порівнянні з вихідним матеріалом після термообробки. Це зміцнення значно перевищує ефект, викликаний тільки УЗУО (рис. 3.1, крива 1), яка підвищує мікротвердість поверхневого шару від 70 % до 80 % (з 840 МПа до 1420 - 1530 МПа). Більш повну картину можна стримати з використанням двох додаткових характеристик зміцнення, приведених у табл. 3.1.



1 – зразок АМг6 оброблений за допомогою УЗУО; 2 – зразок АМг6 оброблений за допомогою ЕІЛ+УЗУО

Рисунок 3.1 – Залежність мікротвердості від часу УЗУО вихідного зразка і зразка після ЕІЛ

Ступінь зміцнення  $K_{\text{hard}}$  описує зростання мікротвердості, а інтенсивність зміцнення  $I_{\text{hard}}$  є додатковим показником зміни мікротвердості в поверхневому шарі певної товщини  $h_{\text{sl}}$ . У даній роботі для оцінок інтенсивності зміцнення  $I_{\text{hard}}$  була прийнята товщина шару  $h_{\text{sl}} = 50$  мкм, оскільки в поверхневих шарах саме такої товщини при УЗУО різних металів і сплавів зазвичай спостерігається інтенсивне зменшення розмірів елементів структури з формуванням ультрадисперсних або нанорозмірних зеренних структур. Видно, що  $K_{\text{hard}}$  і  $I_{\text{hard}}$  зростають при збільшенні тривалості УЗУО.

Таблиця 3.1 – Властивості сплаву АМг6 після різних обробок.

Матеріал обробка	Мікротвердіс ть Нv, (ГПа)	Ступінь зміцненн я $K_{\text{hard}}$	Інтенсивніс ть зміцнення $I_{\text{hard}}$ , (МПа/мкм)
АМг6 (відпал)	0,84	1	0
АМг6 (УЗУО 15 с)	1,15	1,37	6,2
АМг6 (УЗУО 30 с)	1,43	1,70	11,8
АМг6 (УЗУО 60 с)	1,52	1,81	13,6
АМг6 (ЕІЛ Cu + УЗУО 30 с)	3,1	3,69	45,2

Очевидно, що в разі ударної обробки без попереднього електроіскрового модифікування поверхнєве зміцнення відбувається за механізмами, які характерні для матричного сплаву: це зміцнення магнієм за рахунок інтерметалідних виділень, підвищення щільності дислокацій, а також зміцнення за рахунок зростання кількості меж розділу при формуванні



субзеренної структури і появі великокутових меж. Це підтверджується даними робіт [14, 28], в яких проведено систематичні експериментальні дослідження механізмів зміцнення сплавів Al-5Mg при різних швидкостях деформації стисненням [28] і АМг6 при УЗУО [14, 15]. В роботі [28] при моделюванні деформаційної поведінки сплаву Al-5Mg показано, що сумарне зміцнення за рахунок меж зерен і субзерен, що формуються в процесі деформації, може досягати зміцнення, обумовленого магнієм в твердому розчині і дисперсними виділеннями, викликаючи подвійне збільшення межі плинності і твердості. У сплаві АМг6 після УЗУО за допомогою ТЕМ зафіксовано утворення фрагментованої структури з дуже високою середньою щільністю дислокацій [14]. У той же час, наслідком інтенсивної пластичної деформації, що супроводжується деформаційним розігрівом при багаторазовому ударному впливі, є формування бімодальної структури, що складається з суміші ультрадисперсних зерен і більших субзерен, що містять знижену щільність дефектів [14]. Це дозволяє отримати матеріал з досить високою міцністю і задовільною пластичністю.

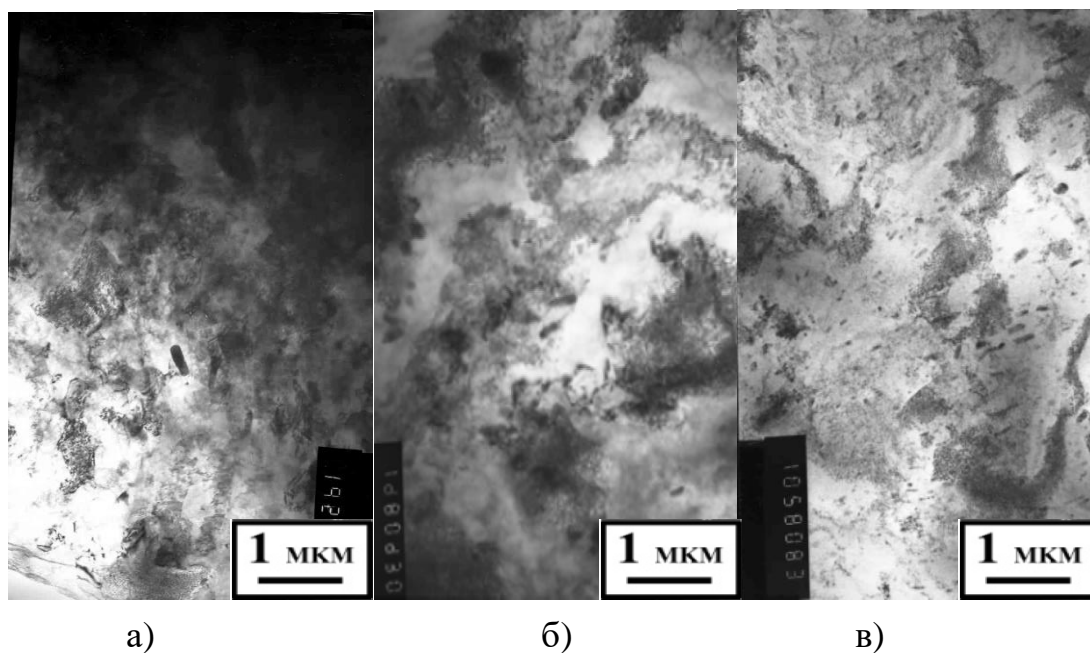
### 3.2 Механізм зміцнення поверхні

На рис. 3.2 наведено ТЕМ зображення мікроструктури сплаву АМг6 після УЗУО (рис. 3.2, а), АМг6 після ЕІЛ Cu +УЗУО (рис.3.2, б) і сплаву Д16 після УЗУО (рис. 3.2, в) та їх зображення електронної дифракції відповідно (рис. 3.3). Очевидно, що типові мікроструктури деформованого сплаву Д16 та деформованого легованого міддю поверхневого шару сплаву АМг6 мають подібний характер.

Міцність металу визначається прикладеним напруженням, необхідним для подолання перешкод, які перешкоджають руху дислокації. Рухомі дислокації взаємодіють із перешкодами в межах мікроструктури, такими як кристалічна решітка, атоми розчинення, осад, інші дислокації та межі зерен. Ми дослідили механізми зміцнення АМг6 шляхом ретельного опису

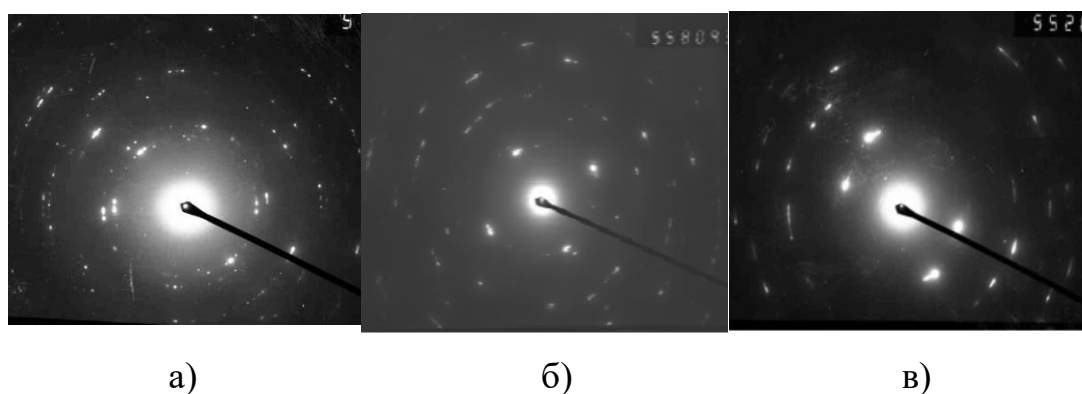
мікроструктури, щоб визначити, які перешкоди існують і які з них домінують у міцності матеріалу.

Всі внески в загальний потік напружень розраховуються на початку виходу (0,2 % деформації), і тому вони називаються приростом межі плинності.



а) АМг6 після УЗУО, б) АМг6 після ЕІЛ Cu +УЗУО, в) Д16 після УЗУО

Рисунок 3.2 – ТЕМ зображення мікроструктури сплавів АМг6 та Д16



а) після УЗУО, б) АМг6 після ЕІЛ Cu +УЗУО, в) Д16 після УЗУО

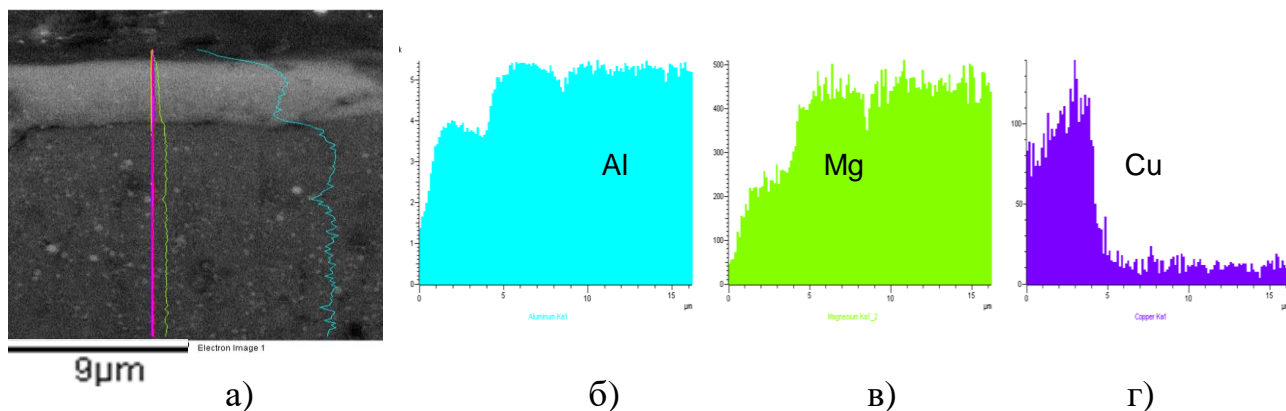
Рисунок 3.3 – Картини електронної дифракції сплаву АМг6 та Д16

Найважливішою перешкодою для руху дислокацій є сама кристалічна решітка. Напруження, необхідне для переміщення дислокацій через решітку, називається напруженням Пейерлса. Напруження Пейерлса в ГЦК металах (таких як Al) є дуже низьким, і дислокації можуть рухатися по декількох системах ковзання та поперечним ковзанням. Внаслідок низького напруження Пейерлса, ГЦК метали із високою чистотою демонструють низьку межу плинності.

Первинні легуючі елементи в АМгб, Mg та Mn є точковими дефектами всередині решітки і виступають в якості перешкод руху дислокації. При низьких значеннях деформації, розчинення атомно-дислокаційних взаємодій призводить до зміцнення матеріалу. В літературі існує певна дискусія щодо того, як відбувається це зміцнення. Було зазначено, що стаціонарні атоми, що розчиняються, взаємодіють з рухливими дислокаціями за допомогою механізму, який називається "пінінгом". У точках, де дислокації зустрічають розчинені атоми, дислокація закріплюється. Інша частина дислокацій продовжує рухатися, опускаючись із цих закріплених місць. У результаті матеріал зміцнюється за рахунок напруження лінії дислокації, що відчувається незакріпленими областями [15]. Проте, також було зроблено припущення, що атоми розчиненої речовини не залишаються нерухомими, а скоріше дифузними до рухливих дислокацій. Обидва типи взаємодії призводять до збільшення межі плинності і загального напруження потоку матеріалу.

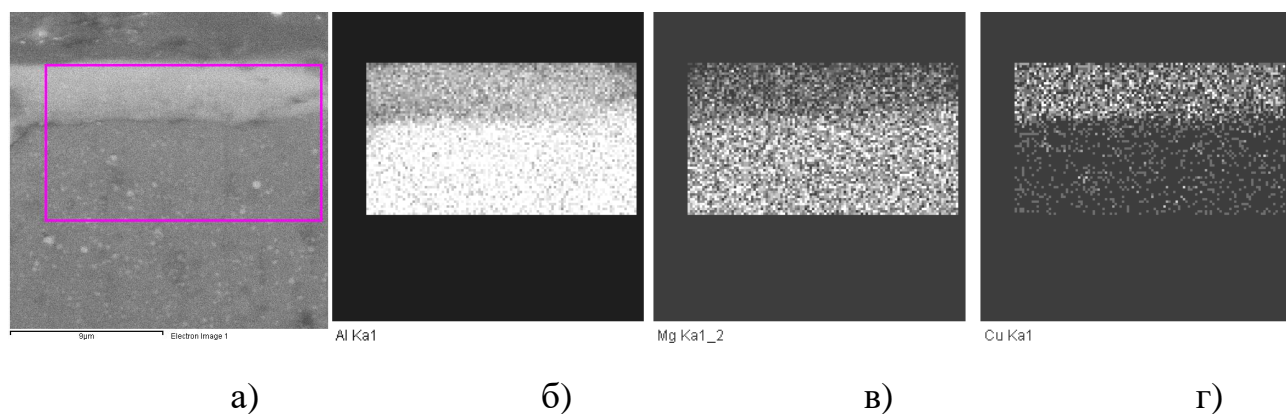
### **3.3 Масоперенос при електроіскровому легуванні**

Результати РЕМ досліджень представлені на рис. 3.4 і рис. 3.5. На рис. 3.4 зображення поперечного перерізу легованого при ЕІЛ міддю зразка сплаву АМгб (рис. 3.4, а), а також концентраційні криві (рис. 3.4, б-г) розподілу по перерізу елементів-складових сплаву (Al, Mg) та легуючого елементу (міді). Карти розподілу елементів у поверхневому шарі показані на рис. 3.5 разом із його зображенням у вторинних електронах.



а) модифікований шар, б) Al, в) Mg, г) Cu

Рисунок 3.4 – РЕМ зображення поперечного перерізу зразка сплаву АМг6 після ЕІЛ Cu + УЗУО та концентраційні криві розподілу елементів у ньому



а) РЕМ зображення, б) Al, в) Mg, г) Cu

Рисунок 3.5 – РЕМ зображення поперечного перерізу зразка сплаву АМг6 після ЕІЛ Cu +УЗУО та карти розподілу елементів у ньому

Видно, що товщина шару з великим вмістом міді доволі незначна (~5 мкм). Однак і в більш глибоких шарах сліди міді спостерігаються, можливо у вигляді інтерметалідних фаз.

### 3.4 Фазовий склад поверхневих шарів алюмінієвого сплаву АМг6

На підставі рентгенівського фазового аналізу поверхневих шарів (рис. 3.6, рис. 3.7 та 3.8) можна зробити висновок, що додатковим фактором зміцнення є формування інтерметалідних фаз міді.

Застосування для легування мідного електрода призводить до більшого розмаїття фазових складових поверхневого шару і несподівано високих значень мікротвердості. Згідно з рентгенівськими даними і діаграмою стану потрійної системи Al-Cu-Mg можливе формування фази  $\text{CuAl}_2$  (тетрагональна решітка), фази  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  (орторомбічна решітка), фази  $\text{Al}_6\text{CuMg}_4$  (кубічна) при істотному вмісті твердого розчину заміщення Al-Cu з ГЦК ґраткою (рис. 3.6, рис. 3.7, рис. 3.8).

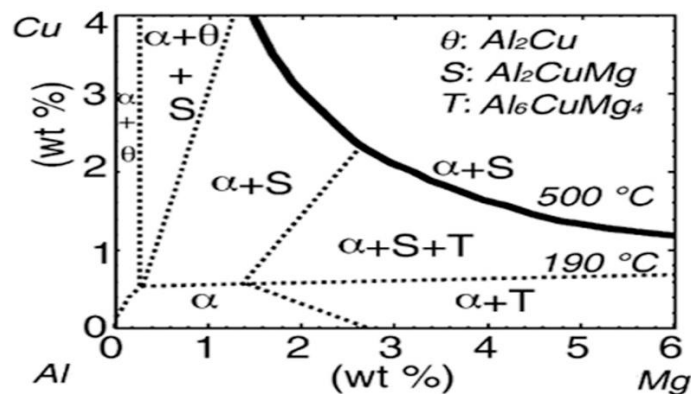


Рисунок 3.6 Рівноважна діаграма стану потрійної системи  
Al-Mg-Cu [30]

Наявність інтерметалідних фаз є непрямым свідченням підвищення концентрації вакансій і деформаційного розігрівання, ініційованих УЗУО. Збільшення кількості вакансій і підвищення температури сприяють прискоренню дифузії легуючих елементів і протіканню фазових перетворень при старінні в модифікованому шарі.

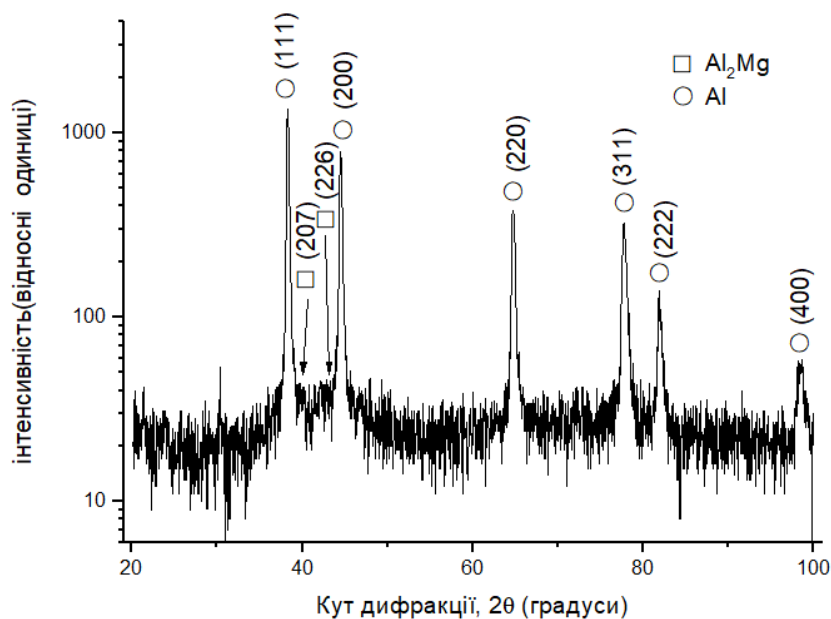


Рисунок 3.7 – Рентгенограма сплаву АМг6 після УЗУО

Підвищення вмісту міді в сплаві АМг6, за хімічним складом наближає поверхневий шар до таких алюмінієвих сплавів як дюралюміні (Д1, Д16). Причому, згідно з рентгенографічними даними в поверхневому шарі після ЕІЛ + УЗУО(рис. 3.9) спостерігається в основному стабільна фаза  $\text{Al}_2\text{Cu}$  - кінцевий продукт ланцюжка фазових перетворень зон Гиньє-Престона:  $\Theta'' \rightarrow \Theta' \rightarrow \Theta$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ).

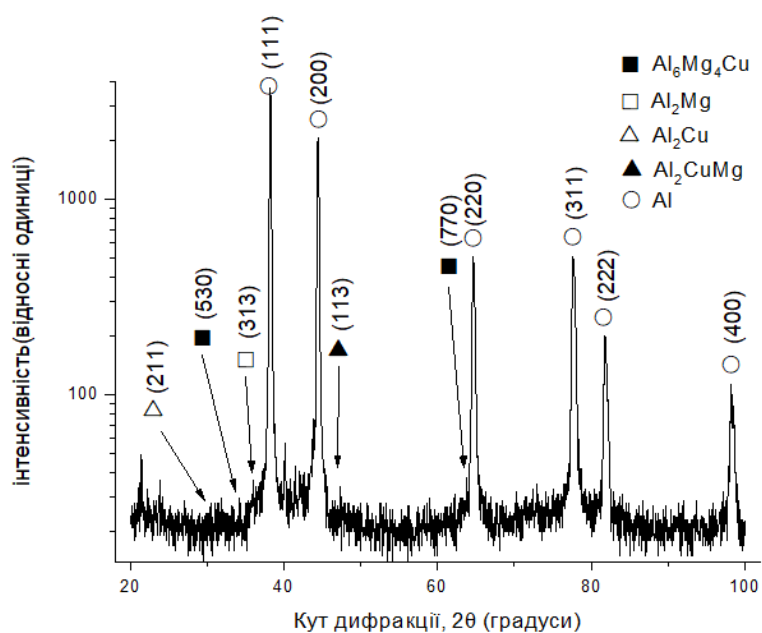


Рисунок 3.8 – Рентгенограма сплаву АМг6 після ЕІЛ + УЗУО

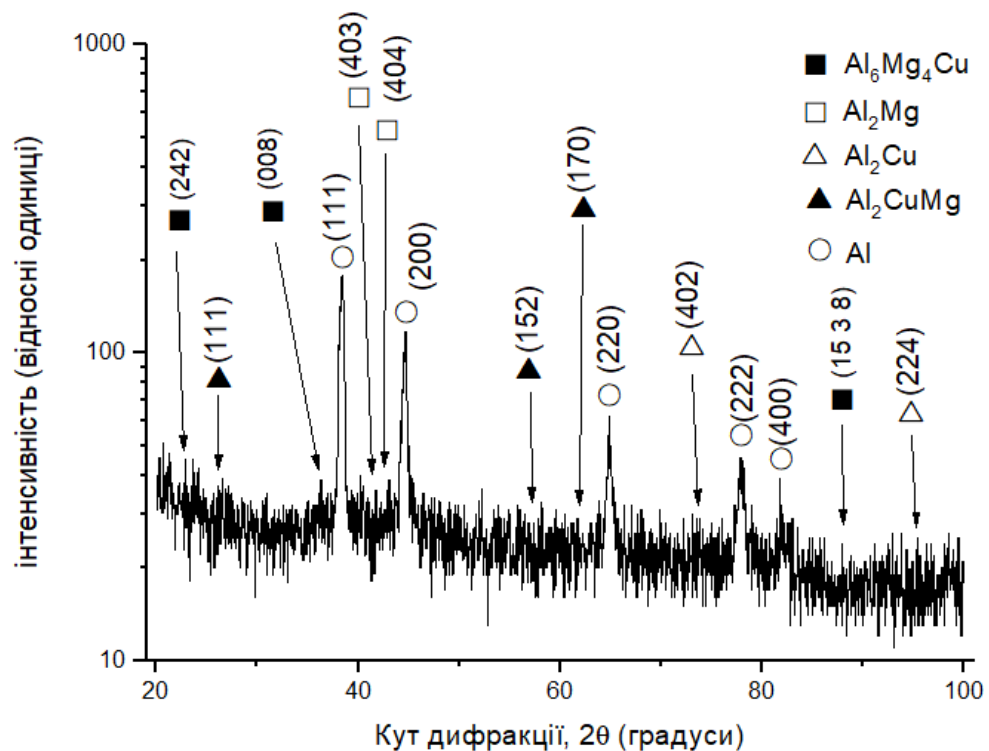


Рисунок 3.9 – Рентгенограма сплаву АМг6 після ЕІЛ + УЗУО за геометрією ковзаючого променя

Можна зробити висновок, що за рахунок вакансійного і температурного факторів процес поступового перетворення метастабільних фаз з утворенням стабільних виділень  $\Theta$ -фази майже завершується, хоча деяка кількість метастабільної  $\Theta'$ -фази все ж залишається, про що свідчать широкі рефлекси на рентгенограмі.

Ще одним позитивним результатом комбінованої обробки ЕІЛ + УЗУО є також підвищена релаксаційна стійкість сплаву АМг6, яка зумовлюється стабільністю структури при довгострокових випробуваннях (експлуатації). Такий висновок випливає з аналізу спостережуваних інтерметалідних фаз і концентрації легуючого елементу в цих фазах (рис. 3.10). Дійсно, сплави, в яких утворюються фази з концентрацією міді, які сильно змінюються з ростом температури, будуть структурно нестабільними через виникнення значних мікронапруг, що грають роль рушійної сили структурних перебудов при

тривалих випробуваннях зразків і термічному впливі (наприклад, при експлуатації виробів) [31].

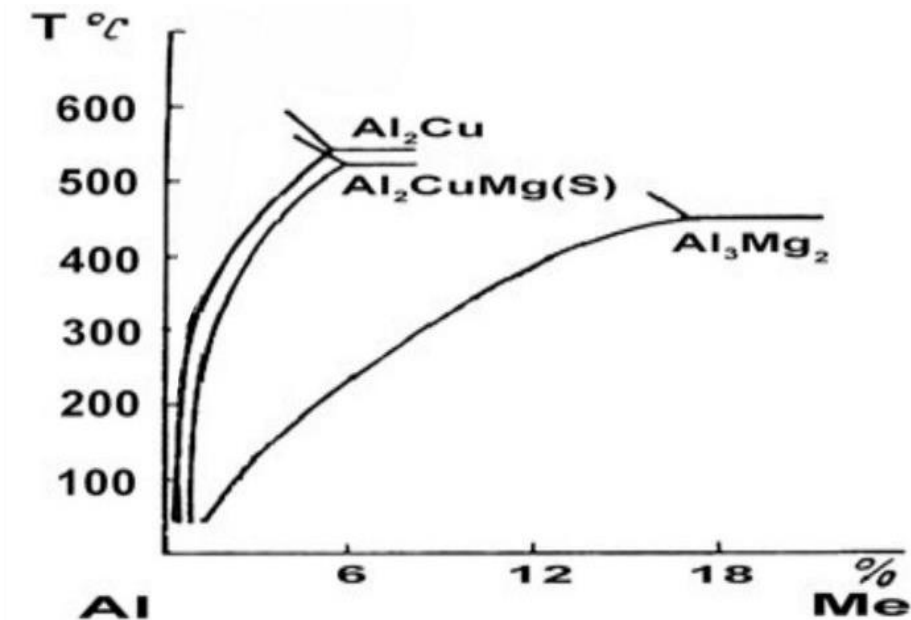


Рисунок 3.10 – Концентраційні залежності існування інтерметалідних фаз в алюмінієвих сплавах систем Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg

На рис. 3.10 суміщені частини діаграм станів бінарних систем Al-Me, відповідно до їх концентрації в сплаві. Видно, що в сплаві АМг6 структура з виділеннями  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  найменш стабільна в порівнянні з фазами, утвореними в поверхневих шарах після ЕІЛ + УЗУО. Поверхневий шар, що містить виділення  $\text{Al}_2\text{Cu}$  і  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ , є більш стабільним (якщо розглядати широкий температурний інтервал до  $550^{\circ}\text{C}$ ). Однак, в реальних умовах експлуатаційний діапазон робочих температур рідко перевищує  $350^{\circ}\text{C}$  навіть з урахуванням розігріву (наприклад, при роботі пар тертя). Таким чином можна зробити висновок, що з цієї точки зору всі виділення, які спостерігаються в поверхневих шарах сплаву АМг6 після ЕІЛ + УЗУО, повинні сприяти досить високій релаксаційній стійкості.

Іншим чинником, що викликає мікро-спотворення в матричному металі, є ступінь невідповідності ґраток сплаву і утворених інтерметалідних фаз. Ряд

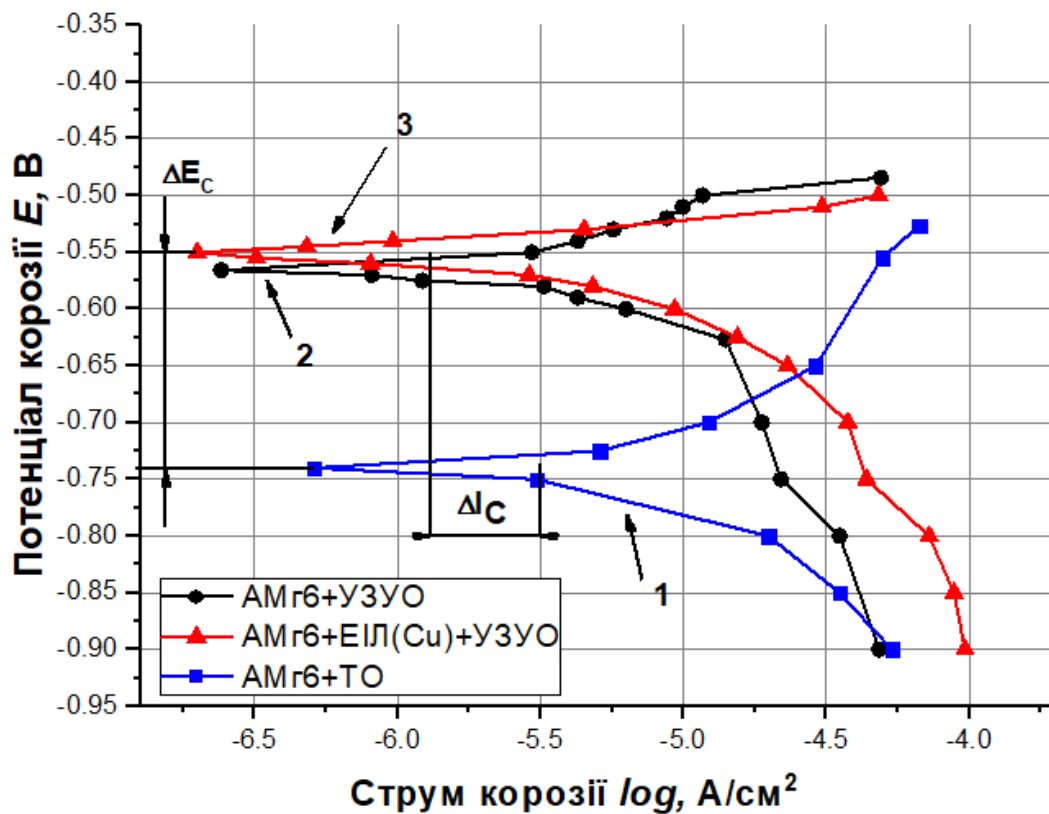


виявлених фаз, які мають кубічну ґратку  $\text{Al}_6\text{Mg}_4\text{Cu}$ , не вносить значних спотворень, а деякі, маючи когерентний зв'язок з матрицею, викликають значне підвищення твердості (зони Гінґе-Престона). Інші фази з ґраткою меншої симетрії, як тетрагональна  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , або орторомбічна  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ , навпаки викликають виникнення додаткових спотворень в матричному металі, які зменшують стабільність сформованих структур і релаксаційну стійкість отриманого стану. Хорошим прикладом впливу сформованих фаз на механічні властивості і їх стабільність можуть бути дані роботи [32]. Авторами показано, що твердість сплаву Д16 після УЗУО залежить від тривалості обробки, і максимальні її значення спостерігаються за значень часу обробки, що не перевищують 60 с. Відзначено, що важливу роль в подальшому знеміцненні матеріалу з ростом часу обробки грають як деформаційний розігрів оброблюваного матеріалу, так і накопичення дефектів кристалічної будови, які визначають кінетичні особливості процесів дифузії легуючих елементів, старіння і послідовність фазових перетворень.

### **3.5 Корозійні властивості сплаву АМг6 після електроіскрового легування та ультразвукової ударної обробки**

З метою виявлення впливу ЕІЛ та УЗУО на корозійні властивості одержано криві поляризації для зразків сплаву АМг6 у вихідному стані, після УЗУО, а також ЕІЛ + УЗУО (рис. 3.11).

Можна стверджувати, що УЗУО сприяє підвищенню корозійної стійкості поверхні сплаву АМг6 порівняно з необробленим зразком (рис. 3.11, 3), оскільки спостерігається зростання потенціалу корозії та зменшення струму корозії (рис. 3.11, 2). ЕІЛ + УЗУО не дає значних змін потенціалу та струму корозії (рис. 3.11, 2), по відношенню до зразку обробленого лише УЗУО.



1 – зразок у вихідному стані; 2 – зразок оброблений за допомогою УЗУО;  
3 – зразок оброблений за допомогою ЕІЛ+УЗУО

Рисунок 3.11 – Корозійні залежності потенціалу корозії від щільності струму

Оброблені зразки по відношенню до вихідного демонструють підвищення  $E_c$  на  $\sim 20$  мВ. Відомо, що матеріали з більш негативним  $E_c$  зазвичай мають більш значне корозійне пошкодження, тоді як матеріали з позитивним  $E_c$  (або менш негативним, як в нашому випадку) показують більш високу корозійну стійкість [23,24]. Щільність струму корозії  $I_c$ , що характеризує ступінь деградації матеріалу при корозійному впливі, нижче для більшої корозійної стійкості [24]. Величини  $I_c$ , що визначаються перетином дотичних до кривих анодної і катодної поляризації, значно зменшуються після УІТ і до значень, на порядок менших, ніж для вихідного сплаву.

Таким чином порівняно з необробленим зразком АМг6, синтез композитних шарів методом ЕІЛ + УЗУО дозволяє покращити корозійну стійкість сплаву, потенціал корозії збільшується.

### 3.6 Висновки до розділу 3

1. За допомогою рентгенівського фазового аналізу встановлено, що ультразвукова ударна обробка призводить до певного диспергування субзеренної/зеренної структури та формування залишкових напружень стиснення, а також до зниження шорсткості поверхні.

2. Електроіскрове легування мідним електродом веде до утворення в поверхневому шарі товщиною до 50 мкм різних інтерметалідних фаз ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ,  $\text{Al}_6\text{Mg}_4\text{Cu}$ ).

3. Результатом комбінованої обробки ЕІЛ + УЗУО є наявність інтерметалідів і великої кількості дислокаційних скупчень і субграниць, які ведуть до суттєвого підвищення мікротвердості сплаву АМг6: в 2,5 і в 3,5 рази у порівнянні з відпаленим станом. Обговорені питання стабільності сформованих структур, які впливають на релаксаційну стійкість сплаву при циклічному навантаженні та термічному впливі.

4. Можна стверджувати, що легування поверхні міддю та УЗУО сприяє підвищенню корозійної стійкості поверхні сплаву АМг6 порівняно з необробленим зразком, оскільки спостерігається зростання потенціалу корозії та зменшення струму корозії.

## 4 ОРГАНІЗАЦІЙНА- ЕКОНОМІЧНО ЧАСТИНА

### 4.1 Науково-технічна актуальність НДР

Створення конструкційних матеріалів нового покоління з покращеними функціональними властивостями для роботи в умовах комбінації силових та температурних полів, впливу агресивних середовищ, глибокого вакууму, високого тиску тощо є актуальним завданням сучасного матеріалознавства [1]. Проте зазвичай постає необхідність отримання з'єднань типу «метал – метал» (навіть у разі взаємної нерозчинності), «метал (сплав) – оксид», «метал (сплав) – неметал (наприклад, вуглецеві нанотрубки)», саме у приповерхневих шарах виробів.

Одним з найбільш ефективних методів модифікації поверхні є технологія електроіскрового легування та ультразвукової ударної обробки (УЗУО).

Зразки виготовлені зі сплаву АМг6 (склад (ваг. %): Al – 93,6 %, Mg – 6,05 %, Mn – 0,625 %, Fe – 0,4 %, Si – 0,4 %, Cu – 0,1 %, Zn – 0,2 %, Ti – 0,05 %)). Дана марка алюмінієвого сплаву належить до групи Al-Mg-Mn – деформівних і досить пластичних сплавів. Подібні властивості проявляються вже при кімнатній температурі, в той час, як при підвищених сплав АМг6 демонструє відмінну зварюваність і середні характеристики. Будучи термічно незміцненим, найбільшого поширення він отримав в виробництві біметалевих листів.

У той же час дія циклічних і динамічних навантажень при експлуатації може призводити до деградації поверхневих шарів, що істотно знижує довговічність виробів за рахунок втоми і зносу [1, 2]. Тому актуальним напрямком поліпшення експлуатаційних властивостей є модифікація робочих поверхонь цих сплавів.

Разом з тим, на даний момент дуже мало фахових публікацій за темою, що вказує на наукову новизну та підкреслює необхідність проведення досліджень з метою підвищення механічних характеристик сплаву АМг6.

#### **4.2 Мета і завдання науково-дослідницької роботи**

Метою даної роботи є дослідження хімічного та фазового складу, змін мікротвердості поверхневих шарів алюмінієвого сплаву АМг6 після електроіскрового легування та ультразвукової ударної обробки.

Для досягнення поставленої задачі потрібно було виконати наступні етапи:

- 1) провести аналіз публікацій з теми і обґрунтувати напрями досліджень;
- 2) розробити методику проведення дослідження;
- 3) обробити отримані дані та узагальнити результати.

#### **4.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження**

Розрахунок усіх витрат на НДР, пов'язаний з темою та складністю роботи. Це надає можливість встановити планову вартість даної теми. Планування кошторису теми здійснюється для зниження трудових та матеріальних витрат. Робиться це з метою досягнення оптимального результату за найменших витрат.

Планова собівартість визначається за наступними статтями витрат:

- а) заробітна плата науково-дослідницького персоналу;
- б) єдиний соціальний внесок;
- в) вартість матеріалів, необхідних для проведення НДР
- г) вартість спеціального обладнання для виконання НДР;
- д) витрати на службові відрядження;
- е) інші прямі невраховані витрати по темі;

ж) накладні витрати.

#### 4.3.1 Зарплата виконавців по темі

Витрати за цією статтею включають заробітну плату працівників всіх категорій, зайнятих при виконанні даної роботи.

Заробітна плата вираховується окремо для кожного робітника, і на основі даних по трудомісткості. Розрахунок проводиться в людино-днях. Перелік робіт та трудомісткість представлена в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахунок трудомісткості виконання дипломної роботи

Етапи НДР	Трудомісткість, людино-дні			
	Старший науковий співробітник	Молодший науковий співробітник	Інженер	Лаборант
Підготовчий	6	5	5	-
Проведення експерименту	15	6	35	36
Написання записки	9	-	5	-
Оформлення роботи, захист	6	-	7	-
Разом	36	11	52	36

Денні зарплати визначаються як відношення місячного окладу до умовного місяця (для НДР з п'ятиденним робочим тижнем складає 21,2 дня).

Таблиця 4.2 – Розрахунок фонду заробітної плати виконавців теми

Посада	Трудомісткість, людино-днів.	Місячний оклад, грн	Денна заробітна плата, грн	Сумарна заробітна плата, грн
Старший науковий співробітник	36	13 140	619,81	22 313,16
Молодший науковий співробітник	11	10 720	505,66	5 562,26
Інженер	52	5 206	245,57	12 769,64
Лаборант	36	4 110	193,87	6 979,32
Разом				47 624,38

Перемножуючи середньоденну заробітну плату за кожною категорією виконавців на відповідну планову трудомісткість робіт, розраховується плановий фонд заробітної плати всіх виконавців. Результати розрахунку фонду заробітної плати з теми зведено у таблиці 4.2.

#### 4.3.2 Єдиний соціальний внесок

Сума єдиного соціального ( $B_c$ ) визначаються у відсотках від загального фонду заробітної плати виконавців з теми. Норматив відрахувань необхідно брати в розмірі 22 % загального фонду заробітної плати. Таким чином, єдиний соціальний внесок складе:

$$B_c = 47\,624,38 \cdot 0,22 = 10\,477,36 \text{ грн}$$

#### 4.3.3 Витрати на матеріали, що використовуються в роботі

Витрати на матеріали, які необхідні для проведення даної НДР, вираховуються з ціни одиниці і загальної кількості використаного матеріалу. Результати розрахунків зведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Вартість матеріалів необхідних для виконання НДР

Найменування матеріалів	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн.
Зразки АМгб	шт.	20	1,5	30
Мідний електрод	шт.	30	3	90
В цілому	120			

Транспортно заготівельні витрати складають 10 % від планової вартості використаних матеріалів, тоді загальні витрати складають:

$$B_m = 120 \cdot 1,1 = 132 \text{ грн.}$$

#### 4.3.4 Витрати на спеціальне обладнання та прилади

Використовувалося вже існуюче обладнання, тому в роботі даній роботі не відбувалася закупівля нового обладнання.

#### 4.3.5 Витрати на службові відрядження

Згідно плану НДР, не передбачаються службові відрядження, тому за даною статтею витрати не передбачаються.



#### 4.3.6 Інші прямі невраховані витрати

В цій статті поєднуються всі витрати на проведення НДР, що не увійшли до попередніх статей. При проведенні даної роботи інші прямі витрати складають 10 % від суми врахованих витрати на НДР.

$$I_v = (47\,624,38 + 10\,477,36 + 132) \cdot 0,1 = 5\,823,40 \text{ грн.}$$

#### 4.3.7 Накладні витрати

До накладних витрат (Нв) відносять:

- а) заробітна плата адміністративна – управлінського, господарського та обслуговуючого персоналу з єдиним соціальним внеском;
- б) витрати на придбання експериментального спеціального обладнання та приладів;
- в) витрати по охороні праці та на техніку безпеки;
- г) утримання виробничих площ, приладів, устаткування та установок;
- д) витрати на воєнізовану охорону;
- е) інші загальногосподарські та дослідницькі витрати.

За нормативами для КПІ ім. Ігоря Сікорського величина накладних витрат складає 20 % від суми всіх прямих витрат по темі.

$$N_v = (47\,624,38 + 10\,477,36 + 120 + 5\,823,40) \cdot 0,2 = 12\,810 \text{ грн.}$$

#### 4.3.8 Планова кошторисна вартість НДР

Виконані розрахунки дозволяють визначити загальну планову кошторисну вартість НДР. Плановий кошторис витрат по темі досліджень наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Планова кошторисна собівартість НДР за темою

Назва статей	Умова призначення	Сума, грн.	Сума, %	Обґрунтування
Заробітна плата виконавців теми	ФЗП	47 624,38	61,9	За розрахунком
Єдиний соціальний внесок	В <sub>С</sub>	10 477,36	13,6	22 % від ЗП
Вартість основних матеріалів	В <sub>м</sub>	120	0,15	За розрахунком
Вартість спец. обладнання	В <sub>об</sub>	-	-	Не планується
Витрати на послуги сторонніх організацій	В <sub>стор</sub>	-	-	Не планується
Витрати на службові відрядження	В <sub>від</sub>	-	-	Не планується
Інші прямі витрати	І <sub>в</sub>	5 823,40	7,57	10 % від суми врахованих витрати
Накладні витрати	Н <sub>в</sub>	12 810	16,67	20 % від суми всіх прямих витрат
Разом	В <sub>НДР</sub>	76855,14	100	Сума всіх попередніх

#### 4.4 Економічна ефективність НДР

Розрахунок очікуваного економічного ефекту НДР необхідно для визначення доцільності проведення даної роботи. Проте він може бути розрахований лише по НДР, які безпосередньо спрямовані на створення нових матеріалів, покращення параметрів якості продукції, а також створення нових конструкцій.

Дослідження, що проводились в даній роботі, є складовою частиною комплексної задачі, тому для визначення річного економічного ефекту використовується бальна система оцінки економічної ефективності за наступними показниками:

а) важливість розробки ( $K_1$ );

- б) можливість використання результатів розробки ( $K_2$ );
- в) теоретичне значення та рівень новизни ( $K_3$ );
- г) складність дослідження ( $K_4$ ).

Коефіцієнт  $K_1$  може приймати наступні значення:

- а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- в) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- д) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт  $K_2$  може приймати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані багатьма організаціями – 5 балів;
- г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;
- д) результатами розробки можуть користуватися в різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт  $K_3$  може приймати такі значення:

- а) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;
- б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;
- в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково

змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики або щонебудь подібне – 6 балів;

д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт  $K_4$  може приймати такі значення:

а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;

б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;

в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;

г) робота виконується багатьма підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;

д) робота виконується багатьма організаціями, витрати більше 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4, \quad (4.1)$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 4.5 становить:

$$Б = 3 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 5 = 225$$

Умовний ефект НДР:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot Б - E_k \cdot Z_{\text{НДР}}, \quad (4.2)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

$E_k$  – нормальний коефіцієнт економічної ефективності;

$Z_{\text{НДР}}$  – сумарні витрати на дослідницьку роботу.

Таблиця 4.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1.Важливість розробки	$K_1$	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів розробки	$K_2$	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	8
3.Теоретична значимість та рівень новизни розробки	$K_3$	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
4.Складність дослідження	$K_4$	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

Розрахунок згідно формули 4.2

$$E_{\text{НДР}} = 180\,000 - 0,25 \cdot 76\,855,14 = 160\,786,22 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом ефективності  $E$  за формулою 4.3. Він характеризує частку загального ефекту від розробки на умовну одиницю витрат і розраховується по формулі:

$$E = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{заг}}}, \quad (4.3)$$

$$E = \frac{160\,786,22}{76\,855,14} = 2,09$$

#### **4.5 Висновки до розділу**

Розраховали планову кошторисну вартість (собівартість) НДР, яка склала 76 855,14 грн.

Провели економічний аналіз доцільності даної науково-дослідницької роботи та виявили, що дане дослідження є доцільним з економічної точки зору.

## **5 ОХОРОНА ПРАЦІ**

Мета даного розділу – аналіз шкідливих та небезпечних факторів, що можуть призвести до ураження організму та умов, котрі спричиняють травмування під час проведення синтезу захисних покриттів на поверхні алюмінієвого сплаву АМг6 методом електроіскрового легування та ультразвукової ударної обробки.

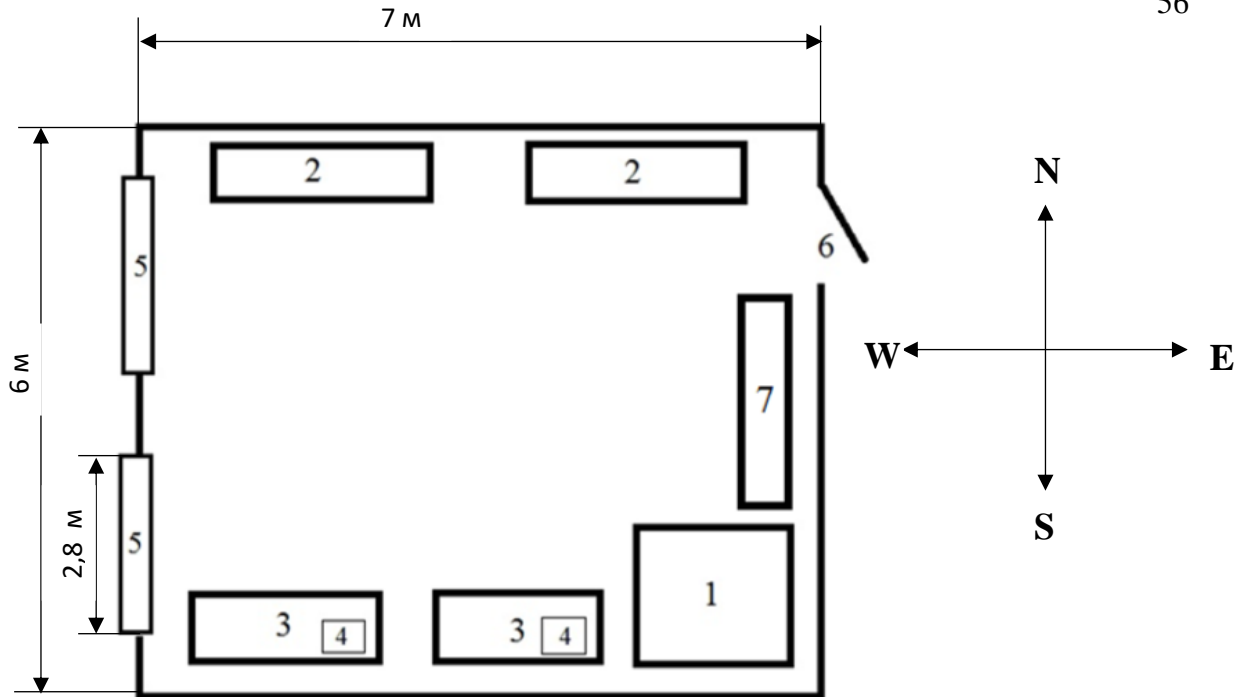
### **5.1 Правові та організаційні основи охорони праці**

Служба охорони праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського (в якому була проведена робота) підпорядковується ректору М.З. Згуровському. Посаду начальника відділу охорони праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського займає Е.Г. Луцик. Відповідальною особою, що гарантує дотримання вимог охорони праці на інженерно-фізичному факультеті є П.І. Лобода, на кафедрі фізики металів (5 поверх навчального корпусу № 9) – Є.В. Іващенко, в науково-дослідній лабораторії № 507, в якій проведено наукові дослідження по роботі – А.І. Мазур.

### **5.2 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів**

#### **5.2.1 Мікроклімат**

Дипломна робота виконана в лабораторії № 507, 5 поверху, навчального корпусу № 9 кафедри фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Схематичне зображення лабораторії із розташуванням всіх її елементів представлено на рис. 5.1.



1 – пічка для відпалу (робоче місце); 2 – шафа; 3 – стіл; 4 – комп'ютер;  
5 – вікно; 6 – двері; 7 – стелаж для розміщення дослідних зразків

Рисунок 5.1 – Схема лабораторного приміщення в якому виконувалася  
дипломна робота

Проведено вимірювання параметрів лабораторного приміщення:

- 1) розміри кімнати: ширина – 6 м, довжина – 7 м, висота – 2,7 м.
- 2) розміри вікон: ширина – 2,8 м, висота – 2,5 м.

Лабораторне приміщення № 507, в якому працює одна особа має площу  $42 \text{ м}^2$  та об'єм  $113,4 \text{ м}^3$ . Розрахована площа, що приходить на одну людину становить  $42 \text{ м}^2$ , та об'єм –  $113,4 \text{ м}^3$ . Отже, об'єм та площа лабораторії відповідають нормам, відповідно до ДСанПіН 3.3.2-007-98, що встановлює норми на величину робочого простору, де на робоче місце однієї людини має відводитись не менше  $6 \text{ м}^2$  площі та  $20 \text{ м}^3$  об'єму [37].

Також важливим аспектом (фактором) для нормальної працездатності працівників є чистота повітря в робочій зоні, освітленість і температура в робочому приміщенні та багато інших чинників, тому виконання дипломної



роботи супроводжувалося дослідженням мікроклімату в приміщенні лабораторії № 507 [37].

Відповідно до «Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюються оптимальні та допустимі параметри, а саме відносна вологість, температура та швидкість руху повітря у робочому приміщенні в залежності від періоду року та категорії важкості робіт [38].

Згідно із ДСН 3.3.6.042-99 умови мікроклімату відносяться до категорії важкості робіт – I б. До даної категорії належать легкі фізичні роботи до 150 Ккал/год, котрі супроводжуються виникненням деякого рівня фізичних напруг, що виконуються сидячи чи стоячи та роботи пов'язані з ходінням [38]. Виміряні та нормовані величини параметрів мікроклімату в робочому приміщенні № 507 наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Мікроклімат приміщення та ДСН 3.3.6.042-99 [38]

Пор а року	Катег орія робіт	Температура, °С			Відносна вологість, %			Швидкість руху повітря, м/с		
		Фак тич.	Доп уст.	Опти мал.	Фак тич.	Доп уст.	Опти мал.	Фак тич.	Доп уст.	Опти мал.
холо дна	I б		20- 24	21-23	59	<75	60-40	0,1	0,1- 0,3	0,1
тепл а		28	21- 28	22-24	55	<65	60-40	0,2	0,1- 0,3	0,2

Аналіз виміряних величин дозволяє стверджувати, що фактичні параметри мікроклімату відповідають оптимальним умовам, за винятком температури повітря в теплий період року. Для постійної роботи в даному приміщенні, тобто забезпечення оптимальних умов, рекомендується встановлення кондиціонера для охолодження повітря.

Для непостійних та короточасних робіт параметри мікроклімату даного приміщення відповідають встановленим нормам.

### 5.2.2 Освітленість

Освітлення робочого приміщення поділяється на:

- 1) природне;
- 2) штучне;
- 3) суміщене.

Природне в свою чергу створюється дією прямих сонячних променів, штучне реалізується за допомогою електричних джерел світла, суміщене внаслідок комбінації природного та штучного. В залежності від характеристики зорових робіт, системи освітлення, найменшого розміру об'єкта розрізнення, контрасту об'єкта розрізнення з фоном, природне і штучне освітлення робочої зони регламентуються нормами ДБН В.2.5-28-2006 [39].

В свою чергу природне освітлення можна поділити на: бокове (здійснюється через світлові отвори в зовнішніх стінах), верхнє (реалізується через ліхтарі та отвори в стелях та перекриттях) та комбіноване, яке є поєднанням двох попередніх [40].

У лабораторній кімнаті № 507 втілюється комбінація природного бокового освітлення та штучного. Дане приміщення характеризується розміщенням вікон з північного боку лабораторії. Відстань від вікна до робочого місця, тобто місця основної роботи складає 4 м. Виходячи з того факту, що розміри зразків не перевищують 5 мм, то дослідну роботу можна прирахувати до класу робіт малої точності (розряд зорових робіт V б). Як було вказано раніше, в дослідній лабораторії втілюється комбінація природного та штучного освітлення. Місцеве освітлення реалізується лампами розжарювання, а загальне – за допомогою 24 люмінесцентних ламп ЛБ-40 [40].

Загальновідомий факт, що правильно організоване освітлення приводить до підвищення рівня працездатності людини, продуктивності та якості виготовленої продукції, зниження рівня виробничого травматизму тощо. До прикладу, збільшення освітленості приміщення зі значень 100 люкс до 1000 люкс при напруженій зоровій роботі забезпечує підвищення

продуктивності праці на 10 % – 20 %, зменшення браку на виробництві на 20 %, зниження кількості нещасних випадків на 30 % [40].

### 5.2.3 Шум

Під шумом розуміється абиякий небажаний звук, який призводить до погіршення самопочуття та здоров'я людини, а також знижує її працездатність та сприяє до отримання травм внаслідок підвищення рівня розсіяності та уважності [40]. Дипломна робота здійснювалась на установці для ультразвукової ударної обробки, котра створює певний рівень шуму в процесі роботи.

Довготривала дія шуму на людину може викликати наступні порушення:

- 1) погіршення пам'яті;
- 2) запаморочення;
- 3) підвищена стомлюваність;
- 4) дратівливість.

Довготривалий та систематичний вплив ультразвукових коливань негативно впливає на організм людини та може викликати порушення нервової, серцево-судинної і ендокринної систем та порушення слуху [40].

Засоби індивідуального захисту від шуму та ультразвуку: протишумні (звукоізолюючі) навушники, шоломи, костюми, звукоізолюючі кабінки, акустичні екрани, тощо. В даній роботі застосовувалися протишумні навушники та акустичні екрани [40].

Встановлення граничних величин шуму на робочих місцях та лабораторних приміщеннях забезпечує ДСН 3.3.6.037-99. Даний документ встановлює принципи, щодо певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних напрямів [41].

Також варто додати, що рівень ультразвуку, який виникає в процесі УЗУО знаходиться в межах норми (не потрапляє в зону знаходження оператора).

#### 5.2.4 Вібрації

При роботі за установкою для ультразвукової ударної обробки виникає певний рівень вібрацій.

Під вібраціями розуміються механічні коливання пружних тіл або коливальні рухи механічних систем. Загалом вплив вібрацій спричиняє негативну дію на організм людини [40].

Найголовнішим методом захисту від вібрації, котрий використовується в інженерії, а також в даній роботі, є їх гасіння, внаслідок ізоляції джерел коливань від опорних поверхонь за допомогою гумових, пружинних або комбінованих ізоляторів [40].

Частотний діапазон вібрацій, котрі діють на людину складає від десятих часток одного Гц до декількох тисяч Гц. Характерними ознаками шкідливого впливу вібрації на людину є зміни її функціонального стану:

- 1) підвищена втомлюваність;
- 2) збільшення часу моторної реакції;
- 3) порушення вестибулярної реакції.

Медичні дослідження показали, що результат впливу вібрацій викликає розвиток нервово-судинних розладів, ураження опорно-рухової та інших систем організму. До лікувально-профілактичних методів зменшення впливу вібрацій належать масажі, гідропроцедури та заходи спрямовані на загальне укріплення організму [40]. Засоби захисту від вібрації подані в державному стандарті ДСТУ ГОСТ 12.1.012:2008. ССБТ "Вібраційна безпека. Загальні вимоги" [42].

#### 5.2.5 Електробезпека

Електробезпека – система організаційних і технічних заходів та засобів, котрі забезпечують захист людей від шкідливої і небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електричного поля і статичної електрики [40].

У дослідній лабораторії № 507-9 розміщено декілька електричних приладів, а саме персональний комп'ютер, електрична, установка для електроіскрового легування піч та установка для ультразвукової ударної обробки.

Згідно із діючими правилами побудови та розміщення електроустановок ДНАОП 0.00-1.32-01 дослідне приміщення № 507-9 з точки зору небезпеки ураження електричним струмом належить до класу приміщень без підвищеної небезпеки (сухі приміщення із температурою повітря  $18^{\circ}\text{C}$  –  $25^{\circ}\text{C}$  та струмонепривідною підлогою) [43]. Електроустановки, котрі використовувалися при виконанні дипломної роботи, живляться напругою 220 В (персональний комп'ютер, установка для електроіскрового легування, установка для ультразвукової ударної обробки та електрична піч) змінного струму частотою 50 Гц.

Головні чинники, які впливають на тяжкість ураження людини електричним струмом, поділяються на три групи: електричного характеру, неелектричного характеру і чинники виробничого середовища [40].

Основні характеристики електричного характеру:

- 1) величина струму, що проходить крізь людину;
- 2) напруга;
- 3) опір тіла людини;
- 4) рід і частота струму.

До основних чинників неелектричного характеру належить шлях струму через людину, індивідуальні особливості та стан організму людини, а також час дії струму. Чинниками виробничого середовища являються умови оточуючого середовища, а також схема включення людини в електричну мережу [40].

Під час розробки захисних заходів, важливим критерієм є величина струму. Прийнято вважати небезпечним струм величиною 25 мА, тобто такий, при якому важко самотійно відірватись від провідника. Струм величиною 100 мА вважається смертельно небезпечним. Електричний струм здійснює

термічний, електролітичний та біологічний вплив на людину при проходженні через неї [40, 46]. Термічний вплив призводить до отримання серйозних опіків окремих частин тіла, пошкодження судин та нервів. Електролітичний вплив призводить до розкладання крові та інших органічних речовин, як наслідок викликає порушення їх фізико-хімічного складу. Біологічний вплив проявляє себе у вигляді особливого специфічного процесу. Навчальна лабораторія № 507, в якій проводилися дослідження, характеризується правильно виконаним захисним заземленням корпусів, електроустаткування та приладів. Розташування робочого місця виключає можливість одночасного доторкання до корпусів електроустаткування та приладів.

### **5.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці**

#### **5.3.1 Організація робочого місця**

Виробничі приміщення, організації і обладнання робочих місць наведені в НПАОП 0.00-7.15-18. Організація робочого місця користувача персонального комп'ютера має забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози із наступними ергономічними характеристиками [44, 45]:

- 1) зап'ястя зігнуті під кутом не більше  $15^{\circ}$  –  $20^{\circ}$  відносно вертикальної площини;
- 2) лікті зігнуті під кутом  $70^{\circ}$  –  $90^{\circ}$  до вертикальної площини;
- 3) передпліччя встановлені у вертикальному положенні;
- 4) стегна знаходяться в горизонтальній площині;
- 5) ступні ніг розміщені на підлозі або на підставці для ніг.

Висота робочої поверхні столу для роботи у сидячому положенні в межах 680 мм – 800 мм, а ширина забезпечувати здатність працівника до виконання необхідних операцій в зоні досяжності моторного поля. Рекомендовані параметри столу для роботи: висота – 725 мм, ширина робочої зони в межах від 600 мм до 1400 мм, довжина від 800 мм до 1000 мм [44].

### 5.3.2 Вентиляція

Відповідно до ДСТУ 2388-94 місцева вентиляція повинна забезпечувати вилучення забрудненого повітря із зон, в основному, зосередженого виділення шкідливих речовин. В інших випадках може використовуватись загальнообмінна вентиляція. Загалом, вона повинна виконуватись у комбінації з місцевою вентиляцією, котра розрахована на видалення з виробничого приміщення шкідливих речовин нелокалізованих місцевими витяжними пристроями [46].

## 5.4 Розрахунок інженерного рішення

### 5.4.1 Розрахунок вентиляції

Розрахунок об'єму повітря, котре необхідно видалити місцевою вентиляцією  $L_m$ , визначають, виходячи з заданої швидкості всмоктування біля джерела виділення шкідливих речовин, характеристики спектру швидкостей всмоктування для певної конструкції всмоктувального отвору та наявності поверхонь, що огорожують зону всмоктування. У цьому випадку [47, 48]:

$$L_m = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0, \quad (5.1)$$

де  $F_0$  – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача,  $m^2$ ;

$V_0$  – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі,  $m/s$ .

Площу  $F_0$  визначають конструктивними особливостями технологічного обладнання та вибраного витяжного пристрою [47, 48]. Значення  $V_0$  розраховується на підставі забезпечення заданої швидкості повітря  $V_x$  (0,5  $m/s$ ) у зоні обробки на відстані  $x$  від центра всмоктуючого отвору [47, 48]:

$$V_0 = 16 \cdot V_x \cdot (x/d)^2, \quad (5.2)$$

де  $d$  – діаметр отвору,  $m$ ;

$x$  – відстань до робочої поверхні, м.

На рис. 5.2 наведено принципову схему місцевої вентиляції необхідної для проведення УЗУО.



Рисунок 5.2 – Схема місцевої вентиляції

У результаті розрахунків встановлено, що швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі  $V_0$  має становити 22 м/с, а об'єм повітря, що повинно бути видалене місцевою вентиляцією  $L_m$  – 5654 м<sup>3</sup>/год.

### 5.5 Пожежна безпека

Категорія пожежної небезпеки приміщення (будівлі, споруди) – це класифікаційна характеристика пожежної небезпеки об'єкта, що визначається кількістю і пожежонебезпечними властивостями речовин і матеріалів, які знаходяться (обертаються) в них з урахуванням особливостей технологічних процесів, розміщених в них виробництв [40].

Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007, приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою поділяють на п'ять категорій (А, Б, В, Г, Д) [39].



Можливо зробити висновок, що приміщення лабораторії № 507-9 за пожежонебезпекою відноситься до категорії «Г» (в лабораторії є негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; горючі гази, спалимі рідини, тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо) [40]. Найбільш пожежонебезпечне місце у лабораторії – місце в якому прокладена електропроводка. Загоряння в приміщенні може виникнути внаслідок короткого замикання в електропроводці [49]. План евакуації із лабораторії у випадку виникнення пожежі наведено на рис. 5.3.



Рисунок 5.3 – План евакуації з лабораторії № 507-9

Із засобів пожежогасіння у лабораторії наявні вогнегасники ОУБ-2. Засобами виявлення та оповіщення про пожежу є автоматичні датчики сигналізатори типу ДТП. До засобів комунікації та оповіщення співробітників про пожежну ситуацію відноситься внутрішньо-службовий зв'язок. На випадок пожежі існує план евакуації працівників з лабораторії № 507-9.

## 5.6 Висновки до розділу 4

1. Показано, що за допомогою комбінованої електроіскрової і ультразвукової ударної обробки поверхні алюмінієвого сплаву АМг6, шляхом вибору оптимального режиму обробки і матеріалу легуючого електрода, вдається отримувати модифіковані поверхневі шари, товщиною 25-50 мкм, з підвищеними механічними та корозійними властивостями.

2. Електроіскрове легування збільшує мікротвердість поверхні вдвічі, а зростання тривалості наступної УЗУО – у 3,6 разів у порівнянні із мікротвердістю вихідного сплаву АМг6, завдяки перебігу фазових і структурних перетворень за умов такої комбінованої обробки.

3. Збільшення мікротвердості при ЕІЛ обумовлено сукупністю ряду з перерахованих нижче факторів, а саме:

- утворенням твердих розчинів  $AlCu$ ;
- формуванням дисперсних виділень зміцнюючих фаз ( $Al_2Cu$ ,  $Al_2CuMg$ ,  $Al_6Mg_4Cu$ );
- мікроспотвореннями в матричному металі, що викликані формуванням твердих розчинів і / або інтерметалідних фаз.

УЗУО модифікованих шарів веде до – формування високого рівня залишкових напружень стиснення, а також деякого диспергування субзеренної / зеренної структури.

4. Можна стверджувати, що УЗУО сприяє підвищенню корозійної стійкості поверхні сплаву АМг6 порівняно з необробленим зразком. Оброблені зразки по відношенню до вихідного стану демонструють підвищення  $E_C$  на  $\sim 20$  мВ. Щільність струму корозії  $I_C$ , що характеризує ступінь деградації матеріалу при корозійному впливі, нижче у зразків з комбінованою обробкою.

## ВИСНОВКИ

1. Показано, що за допомогою комбінованої електроіскрової і ультразвукової ударної обробки поверхні алюмінієвого сплаву АМг6, шляхом вибору оптимального режиму обробки і матеріалу легуючого електрода, вдається отримувати модифіковані поверхневі шари, товщиною 25-50 мкм, з підвищеними механічними та корозійними властивостями.

2. Електроіскрове легування збільшує мікротвердість поверхні вдвічі, а зростання тривалості наступної УЗУО – у 3,6 разів у порівнянні із мікротвердістю вихідного сплаву АМг6, завдяки перебігу фазових і структурних перетворень за умов такої комбінованої обробки.

3. Збільшення мікротвердості при ЕІЛ обумовлено сукупністю ряду з перерахованих нижче факторів, а саме:

- утворенням твердих розчинів  $AlCu$ ;
- формуванням дисперсних виділень зміцнюючих фаз ( $Al_2Cu$ ,  $Al_2CuMg$ ,  $Al_6Mg_4Cu$ );
- мікроспотвореннями в матричному металі, що викликані формуванням твердих розчинів і / або інтерметалідних фаз.

УЗУО модифікованих шарів веде до – формування високого рівня залишкових напружень стиснення, а також деякого диспергування субзеренної / зеренної структури.

4. Можна стверджувати, що УЗУО сприяє підвищенню корозійної стійкості поверхні сплаву АМг6 порівняно з необробленим зразком. Оброблені зразки по відношенню до вихідного стану демонструють підвищення  $E_C$  на  $\sim 20$  мВ. Щільність струму корозії  $I_C$ , що характеризує ступінь деградації матеріалу при корозійному впливі, нижче у зразків з комбінованою обробкою.

5. Проведений економічний аналіз даної науково-дослідної роботи показав, що дане дослідження є доцільним з економічної точки зору.

6. Аналіз умов праці в лабораторному приміщенні засвідчив, що мікроклімат, організація робочого місця та освітлення відповідають вимогам регламентованих санітарних норм, а рівень шуму, ультразвуку та вібрацій не перевищує встановлених допустимих норм.

## CONCLUSIONS

1. It has been shown that using the combined electroscope and ultrasonic shock treatment of the surface of the aluminium alloy AMg6, by choosing the optimal treatment mode and the material of the doping electrode, it is possible to obtain modified surface layers with a thickness of 25-50 microns, with increased mechanical and corrosion properties.

2. Electrospray doping increases the microhardness of the surface by half, and the growth of the duration of the next UIT is 3,6 times in comparison with the microhardness of the initial AMg6 alloy, due to the course of phase and structural transformations under the conditions of such combined treatment.

3. Increase of microhardness in EIL is caused by a combination of a number of factors, namely:

- formation of solid solutions of AlCu;
- formation of dispersed isolation of strengthening phases ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ,  $\text{Al}_6\text{Mg}_4\text{Cu}$ );
- microscopic tiles in a matrix metal caused by the formation of solid solutions and/or intermetallic phases.

The ultrasound of modified layers leads to - formation of a high level of residual stresses of compression, as well as some dispersion of subgrain/grain structure.

4. It can be argued that UIT promotes an increase in the corrosion resistance of the AMg6 alloy surface compared to the raw sample. The treated samples in relation to the initial state show an increase in  $E_C$  by  $\sim 20$  mV. The current density of corrosion  $I_C$ , which characterizes the degree of degradation of the material under corrosion, is lower in samples with combined treatment.

5. The conducted economic analysis of this research showed that this study is economically feasible.

6. Analysis of working conditions in the laboratory showed that the microclimate, the organization of the workplace and lighting meet the requirements

of regulatory sanitary norms, and noise, ultrasound and vibration levels do not exceed the established permissible standards.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сидоренко С.І. Деформаційне формування наноструктурованих композитів на поверхні алюмінієвого сплаву Д16 / С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, І.Є. Котенко, А.П. Бурмак // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2012. – Т. 34, №8. – С. 1101 – 1115.
2. Мовчан В.П. Основи металургії / В.П.Мовчан, М.М. Бережний. – Дніпропетровськ: Пороги, 2001. – 336 с.
3. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий / Д.С. Герцрикен, В.Ф. Мазанко, В.М. Тышкевич, В.М. Фальченко. – Киев: РИО ИМФ, 1999. – 436 с. – (Монография / НАН Украины. Ин-т металлофизики им. Г.В. Курдюмова).
4. Зміна мікротвердості алюмінієвого сплаву Д16 після ультразвукової ударної обробки / Г.І. Прокопенко, С.М. Волошко, І.Є. Котенко, А.П. Бурмак // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. – 2009. – №3. – С. 42 – 46.
5. Упрочнение поверхности сплава Д16 при ультразвуковой ударной обработке / Г.И. Прокопенко, А.Л. Березина, С.М. Волошко [та ін.] // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2010. – Т. 32, №3. – С. 397 – 403.
6. Циклічний характер змін мікротвердості алюмінієвого сплаву Д16 під дією інтенсивних режимів ультразвукової ударної обробки / А.П. Бурмак, С.І. Сидоренко, М.О. Васильєв, С.М. Волошко // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. – 2013. – №1. – С. 57 – 62.
7. Прокопенко Г.И. Исследование режимов поверхностного упрочнения с помощью ультразвука / Г.И. Прокопенко, Т.А. Лятун // *ФиХОМ*. – 1977. – №3. – С. 3 – 7.
8. Кулемин А.В. Ультразвук и диффузия / А.В. Кулемин. – М.: Металлургия, 1978. – 199 с.
9. Влияние ультразвука на степень совершенства монокристаллов алюминия / И.Г. Полоцкий, Д.Е. Овсиенко, З.Д. Ходов [и др.] // *ФММ*. – 1966. – 21, №5. – С. 727-731.

10. Биронт В.С. Ультразвуковая обработка / В.С. Биронт // Литейное производство, металловедение и обработка металлов давлением. – 1971. – № 5. – С. 134 – 138.
11. Массоперенос при ультразвуковой ударной обработке пары медь-алюминий / М.А. Васильев, А.В. Козлов, Г.И. Прокопенко, Б.Н. Мордюк // Металлофизика и новейшие технологии. – 1995. – 15, № 11. – С. 75 – 78.
12. Ультразвукова ударна обробка алюмінієвого сплаву Д16 в інертному середовищі та рідкому азоті / С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, І.Є. Котенко, А.П. Бурмак // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33, №12. – С. 1659 – 1669.
13. Сироватка В.Л. Интерметаллиды системы Fe-Al: методы получения, свойства, покрытия / В.Л. Сироватка, В.Е. Оликер, М.С. Яковлева // Материаловедение. – 2013. – № 3. – С. 46 – 53.
14. Механические свойства, плотность и дефектная структура субмикроструктурного титана ВТ1-0, полученного после интенсивной пластической деформации при винтовой и продольной прокатках / В.И. Бетехтин, О.Р. Колобов, М.В. Нарыкова [и др.] // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 11. – С. 58-63.
15. Крашенинников С.В. Исследование кинетики диффузионных процессов при контактном плавлении металлов в медно-титановом композите, полученном сваркой взрывом / С.В. Крашенинников, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак // Изв. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. ст./ ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – Вып.1, №6. – С. 78 – 81.
16. Васильев М.А. Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации (обзор) / М.А. Васильев, Г.И. Прокопенко, В.С. Филатова // Успехи физики металлов. – 2004. – Т.5, С. 345 – 399.



17. Структурные изменения в алюминиевых сплавах при интенсивной пластической деформации / А.А. Мазилкин, Б.Б. Страумал, С.Г. Протасова [и др.] // Физика твердого тела. – 2007. – Т.49, №5. – С. 824–828.
18. О возможной роли дефектов кристаллического строения в механизмах нанофрагментации зеренной структуры при интенсивной холодной пластической деформации металлов и сплавов / А.И. Лотков, А.А. Батулин, В.Н. Гришков, В.И. Копылов // Физ. мезомех. – 2007. – Т. 10, № 3. – С. 67 – 79.
19. Валиев Р.З. Создание объемных наноструктурных материалов методами интенсивной пластической деформации для инновационных применений в технике и медицине / Р.З. Валиев // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – Т. 18, № 4. – С. 12 – 20.
20. Панин В.Е. Физическая мезомеханика измельчения кристаллической структуры при интенсивной пластической деформации / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11, № 5. – С. 5 – 16.
21. Гречников Ф.В. Влияние термической обработки на деформацию отдельных фаз в сплавах АМг10 и Д16 / Ф.В. Гречников, Е.А. Носова, О.Г. Савельева // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. Часть II. – Красноярск. – 2009. – № 1 (22). – С. 87 – 90.
22. Дюжечкин М.К. Горячедеформированные порошковые материалы системы Al-Si и Al-Si-C для гильз цилиндров ДВС : дисс. на соискание уч. степени к.т.н.: 05.16.06 / М.К. Дюжечкин. – Новочеркасск, 2014. – 139 с.
23. Металознавство: Підручник / [О. М. Бялік, В.С. Черненко, В. М. Писаренко, Ю. Н. Москаленко]; — 2-ге вид., перероб. і доп. - К: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. - 384 с.
24. Commodities [Электронный ресурс]. – Режим доступа: - <http://fx-commodities.ru/articles/amg6-gost-4784-97/> - Дата доступа: 21.05.2019.
25. Бурмак А.П. Формування структурно-фазових станів при ультразвуковому ударному оброблянні та механічні властивості поверхні алюмінієвого

- сплаву Д16: дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: 05.16.01 “Металознавство та термічна обробка металів” / Андрій Петрович Бурмак. – Київ, 2014. – 191 с.
26. Mordyuk B.N. Fatigue life improvement of  $\alpha$ -titanium by novel ultrasonically assisted technique / B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko // *Materials Science and Engineering*. – 2006. – № 437. – P. 396–405.
  27. Ультразвукова ударна обробка поверхневого шару титану BT1-0 в субмікрокристалічному стані / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, Д.В. Павленко, Л.Ф. Яценко // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 16.05.2014. – Том 37. – вип. 1.
  28. Патент № UA 68264. Ультразвуковий інструмент для деформаційного зміцнення і релаксаційної обробки металів / Г.І. Прокопенко, О.Ф. Луговський, В.І. Чорний та інші; заявл. 18.12.02; опубл. 15.07.04, Бюл. № 7.
  29. Хріпта Н.І. Закономірності формування структурно-фазових станів і функціональних властивостей цирконійових стопів за умов ультразвукового ударного оброблення / Н.І. Хріпта // *Успехи физ. мет.* – 2016. – Том 2. – С. 119-152.
  30. Microstructure related enhancement in wear resistance of tool steel AISI D2 by applying laser heat treatment followed by ultrasonic impact treatment / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk, et al. // *Surface & Coatings Technology*. – 2017. – № 328. – P. 344-354.
  31. Wear assessment of composite surface layers in Al-6Mg alloy reinforced with AlCuFe quasicrystalline particles: Effects of particle size, microstructure and hardness / B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko, Yu.V. Milman, et al. // *Wear*. – 2014. – № 319. – P. 84-95.
  32. Искровой разряд и диффузионные процессы в металлах: монография / [В.Ф. Мазанко, Д.С. Герцрикен, В.М. Миронов и др.]; Киев: Наукова Думка, 2014. – 190 с.

33. Structure and wear of Al surface layers inforced with AlCuFe particles using ultrasonic impact peening: effect different particles sizes / B.N. Mordyuk, M.O. Iefimov, K.E. Grinkevich, M.I. Danylenko, A.V. Samelyuk // Surf.Coat.Technol. – 2011. – № 205. – P. 5278–5284.
34. Micromechanical properties of nanocrystalline titanium prepared by low-temperature rolling / L.S. Fomenko, A.V. Rusakova, S.V. Lubenets, V.A. Moskalenko // Low temperature physics. – 2010. – Vol. 36, №7. – P. 809–818.
35. Мильман Ю.В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования / Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (98). – 2011. – №4. – С. 182–187.
36. Мильман Ю.В. Влияние температуры на механические свойства объемного аморфного сплава на основе циркония / Ю.В. Мильман, А.Н. Слипенюк, В.В. Куприн, Д.В. Козырев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (98). – 2011. – №4. – С. 85–88.
37. ДСанПіН 3.3.2-007-98 – Організація і обладнання робочих місць.
38. ДСН 3.3.6.042-99 – Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
39. ДБН В.2.5-28-2006 – Природне і штучне освітлення.
40. Зацарний В.В. Конспект лекцій з дисципліни “Основи охорони праці” / В.В. Зацарний // К.: КПІ, 2014 – 78 с.
41. ДСН 3.3.6.037-99 – Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
42. ГОСТ 12.1.012-2004. ССБТ "Вібраційна безпека. Загальні вимоги".
43. ДНАОП 0.00-1.32-01 – Правила побудови та розміщення електроустановок.
44. НПАОП 0.00-7.15-18 – Виробничі приміщення, організації і обладнання робочих місць.
45. НПАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ.
46. ДСТУ 2388-94 – Системи вентиляції. Терміни та визначення.

47. Левченко О.Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник / О.Г. Левченко // К.: Основа, 2010. – 240 с.
48. Левченко О.Г. Охорона праці: Методичні вказівки до розділу дипломних проектів і робіт для підготовки спеціалістів та магістрів за напрямком 7(8).050504 «Зварювання» усіх форм навчання / О.Г. Левченко // К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 28 с.
49. НАПБ Б.07.005-86 – Нормы определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.